

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À
L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

COMME EXIGENCE PARTIELLE
DE LA MAÎTRISE EN GÉNIE ÉLECTRIQUE

PAR
YAMOUSSA SANOGO

RÉALISATION À L'AIDE D'UNE PLATEFORME NI PXI-E D'UN LECTEUR RFID
RECONFIGURABLE POUR DES APPLICATIONS EN MILIEUX HOSTILES

NOVEMBRE 2016

Université du Québec à Trois-Rivières

Service de la bibliothèque

Avertissement

L'auteur de ce mémoire ou de cette thèse a autorisé l'Université du Québec à Trois-Rivières à diffuser, à des fins non lucratives, une copie de son mémoire ou de sa thèse.

Cette diffusion n'entraîne pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits de propriété intellectuelle, incluant le droit d'auteur, sur ce mémoire ou cette thèse. Notamment, la reproduction ou la publication de la totalité ou d'une partie importante de ce mémoire ou de cette thèse requiert son autorisation.

Remerciements

Au terme du présent travail, je tiens à exprimer toute ma gratitude à l'endroit de toute personne y ayant contribué directement ou indirectement. Je voudrais nommer :

- Mon directeur et mon co-directeur de mémoire Prof. Frédéric Domingue et Prof. Abdel-Omar Dahmane, pour la qualité de leur travail d'encadrement ;
- L'ensemble de mes collègues du Laboratoire de MicroSystèmes et Télécommunications (LMST) ;
- Et tous les membres de ma famille, notamment ma mère Habi, pour son soutien sans faille, inconditionnel et inconditionné.

Résumé

L'identification par radiofréquence (RFID) est l'utilisation des ondes radio pour identifier des objets de façon automatique. En général, un système RFID comprend deux parties : un lecteur et une étiquette ou tag ou encore balise. Le code à barre est considéré comme étant l'ancêtre des tags RFID, mais pas le système RFID. Ce dernier trouva son origine en 1939, lors de la seconde guerre mondiale, sous l'appellation IFF (*Identify Friend or Foe*), où il fut utilisé par les alliés pour identifier les avions amis de ceux ennemis. Les caractéristiques du tag définissent celles du lecteur à utiliser pour sa lecture. Le tag peut être passif, semi-passif ou actif. Selon ses propriétés de lecture/écriture, son alimentation en énergie, sa capacité de mémoire et sa possibilité de communication avec d'autres systèmes, un tag RFID appartient à une des six classes définies par l'organisme EPC Global.

Les tags passifs existent en différentes technologies. Ce travail met un accent sur le modèle de tag passif fonctionnant selon les propriétés piézoélectriques de certains types de matériaux. Grâce à ces propriétés, une entrée électrique est convertible en sortie mécanique et vice versa. Dans les littératures, cette catégorie de tag est connue sous le nom de tag à onde acoustique de surface (*Surface Acoustic Wave tag*, en anglais). De nos jours, ce type de tag RFID est la convoitise de plusieurs recherches en raison de sa totale passivité et la faiblesse de son signal d'interrogation.

Le présent projet se propose de mettre en place un lecteur de dispositifs SAW (tags et capteurs SAW) flexible et fiable pouvant servir d'infrastructure de test à basse, haute et très haute fréquence, ainsi qu'aux microondes.

Nos travaux de recherches menés à cet effet ont conduit à la réalisation d'un lecteur de dispositifs SAW à base des modules PXIe-5673 (générateur de signaux vectoriels) et PXIe-5663 (analyseur signaux vectoriels) de la plateforme PXI Express 1075 de National Instruments®. Le choix de la plateforme NI PXI Express se justifie par (1) son caractère modulaire, (2) la disponibilité des Framework pour des applications RF standard et (3) sa flexibilité à la personnalisation i.e. reprogrammation par des développeurs LabVIEW™ et/ou C/C++. Un analyseur de signaux vectoriels (externe) a permis de valider le lecteur. Comparé aux lecteurs conventionnels des dispositifs SAW, le lecteur SAW développé se distingue par

sa capacité de générer et démoduler un signal BPSK pulsé (étalement de spectre). Il peut également effectuer une analyse spectrale sur le signal reçu.

Les résultats de nos travaux de recherches ont été pour la première fois présentés à la conférence *IEEE Sensors 2015* à Busan, en Corée du Sud, puis publiés dans le journal *IEEE Sensors Journal* sous le titre “*Custom PXIe-567X-based SAW RFID Interrogation Signal Generator*”.

Table des matières

Remerciements.....	II
Résumé	III
Table des matières	V
Liste des figures.....	VII
Liste des abréviations.....	XI
CHAPITRE 1 INTRODUCTION GENERALE DES SYSTEMES D'IDENTIFICATION AUTOMATIQUE.....	1
1.1 DEFINITION.....	1
1.2 TYPES DE SYSTEMES D'IDENTIFICATION AUTOMATIQUE (AUTO-ID).....	1
1.2.1 Le système de code à barres.....	1
1.2.2 Le système de reconnaissance optique des caractères (OCR)	5
1.2.3 Procédures d'identification biométrique.....	5
1.2.3.1 Procédures d'empreintes digitales	6
1.2.3.2 Procédures d'identification vocale et rétinienne.....	6
1.2.4 Les cartes à puce (smart cards)	6
1.2.5 Identification par Radio-Fréquence (RFID).....	7
CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE DES SYSTEMES RFID.....	9
2.1 PETIT RAPPEL HISTORIQUE.....	9
2.2 TERMINOLOGIES EN RFID.....	9
2.3 STANDARDISATIONS DES SYSTEMES RFID.....	19
2.4 SURFACE EQUIVALENCE RADAR (Radar Cross Section)	20
2.5 DIFFERENTES CATEGORIES D'IDENTIFIANTS.....	21
2.5.1 Identifiant d'article de commerce	22
2.5.2 Identifiants GS1 pour le transport et la logistique	22
2.5.2.1 Identifiants GS1 de localisation	22
2.5.2.2 Identifiants GS1 des unités logistiques	23
2.5.3 Identifiants GS1 pour les regroupements dans le transport	24
2.5.4 Identifiants GS1 des actifs à retourner.....	25
2.5.5 Identifiant GS1 des relations de service.....	26
2.5.6 Identifiants GS1 du type des documents et coupons.....	27
2.5.7 Identifiant GS1 des composants d'un ensemble	27
2.6 CLASSES DU SYSTEME RFID	29
2.7 THEORIES ET PRATIQUES DU SYSTEME RFID	31

2.7.1	Système RFID idéal	31
2.7.2	Système RFID en pratique	32
2.7.2.1	Problèmes de définition de la zone interrogation ZI	33
2.7.2.2	Orientation physique des tags	34
2.7.2.3	Sensibilité à l'environnement de déploiement.....	35
2.7.2.4	Sensibilité à la nature de l'objet sur lequel le tag est placé	35
2.7.2.5	Collision entre tags	35
2.7.2.6	Effet de la proximité des tags les uns des autres	36
2.7.2.7	Multiplés lecteurs, unique et multiples Tag(s).....	36
2.7.2.8	Interférence	37
2.7.2.9	Lecteurs mobiles et/ou tags mobiles	37
2.7.3	Paramètres de fonctionnement du système RFID	37
CHAPITRE 3	SYSTÈMES A ONDE ACOUSTIQUE DE SURFACE	43
3.1	TAGS SAW	43
3.1.1	Principe de fonctionnement	45
3.1.2	Conception du tag SAW	46
3.1.3	Tags SAW RFID versus Tags Passifs IC.....	49
3.2	CAPTEURS SAW	49
3.2.1	Capteurs de température	49
3.2.2	Capteurs de pression	50
3.2.3	Capteurs de couple moteur.....	51
3.3	LECTEUR DES DISPOSITIFS SAW	52
3.3.1	Exemple de lecteur conventionnel de tag SAW.....	52
3.3.2	Lecteur SAW à base de la plateforme PXI Express.....	53
3.3.2.1	Objectifs de personnalisation	55
3.3.2.2	Programmation du générateur de signaux vectoriels PXIe-5673.....	56
3.3.2.2.1	Validation du générateur.....	60
3.3.2.3	Programmation de l'analyseur des signaux vectoriels PXIe-5663	63
3.3.2.3.1	Validation de l'analyseur PXIe-5663.....	66
CONCLUSIONS	71
LISTE DES REFERENCES	72
ANNEXES	75

Liste des figures

Figure 1.1. Types de systèmes d'identification automatique[1]	1
<i>Figure 1.2. Familles UPC/EAN avec leurs spécificités [3]</i>	<i>2</i>
Figure 1.3. Exemple de structure d'un code à barres (Universal Product Code) [3],[5].....	3
Figure 1.4. Code à barres 1-D à configuration multi codes	3
Figure 1.5. Code à barres 2-D empilées.....	3
Figure 1.6. Code 2-D matriciel (Quick response).....	3
Figure 1.7. Structure du code QR [6].....	4
Figure 1.8. Exemple d'imprimante de code à barres	5
Figure 1.9. Exemple de scanner de code à barres	5
Figure 2.1. Exemple d'algorithme pour choisir le paramètre Q d'emplacement de comptage.....	17
Figure 2.2. Composition de GTIN [29]	22
Figure 2.3. Exemple d'utilisation de GLN	23
Figure 2.4. Exemple d'application de SSCC et GTIN	23
Figure 2.5. Relations entre SSCC, GSIN et GINC	24
Figure 2.6. Exemple de groupement identifiants GS1	25
Figure 2.7. Exemple d'utilisation de GRAI [33]	25
Figure 2.8. Utilisation de GIAI dans sur les véhicules de transport [33].....	26
Figure 2.9. GSRN utilisé dans un cadre médical (source : http://www.findyourabode.ca/)	26
Figure 2.10. CPID utilise dans le domaine d'automobile [37].....	27
Figure 2.11. Les onze principaux identifiants de EPC Global.....	29
Figure 2.12. Différents scenarios de systèmes RFID en pratique	33
Figure 2.13. Effet d'orientation du tag sur le taux de lecture [9]	34

Figure 3.21. Signal BPSK pulsé à 340MHz, avec une séquence régulièrement alternée	61
Figure 3.22 .Signal BPSK pulsé à 340MHz, avec une générée selon la loi de Galois	61
Figure 3.23. Spectre du signal BPSK pulsé à 2,45GHz, avec une séquence générée selon la loi de Galois	61
Figure 3.24 Comparaisons spectrales entre un signal OOK et deux signaux BPSK pulsés générés par le générateur	62
Figure 3.25. Architecture des modules PXIe-5663	63
Figure 3.26. Seconde option de la Structure Case “ 1” - Démodulation OOK+BPSK	65
Figure 3.27. Code LabVIEW™ des modules PXIe-5663-Analyse spectrale ...	65
Figure 3.28. Seconde option de la Structure Case “2” - Démodulation OOK+BPSK pulse.....	65
Figure 3.29. Interface du démodulateur - Mode spectrale	66
Figure 3.30. Interface du démodulateur - Séquence reçue après démodulation	66
Figure 3.31. Spectre du BPSK pulse, $f_c=5,8\text{GHz}$, $T_{\text{On}} = 1\mu\text{s}$, $T_{\text{Off}}=4\mu\text{s}$	67
Figure 3.32. BPSK - Séquence reçue après démodulation, $f_c=5,8\text{GHz}$, $T_{\text{On}} = 1\mu\text{s}$, $T_{\text{Off}}=4\mu\text{s}$	67
Figure 3.33. Spectre OOK, $f_c=5,8\text{GHz}$, $T_{\text{On}} = 1\mu\text{s}$, $T_{\text{Off}}=4\mu\text{s}$	68
Figure 3.34. OOK - Séquence reçue après démodulation, $f_c=5,8\text{GHz}$, $T_{\text{On}} = 1\mu\text{s}$, $T_{\text{Off}}=4\mu\text{s}$	68
Figure 3.35. Principe de test d'un dispositif SAW	69
Figure 3.36. Schéma de l'architecture proposée pour les tests sans fil.....	70
Figure 0.1. Signal BPSK pulsé à 340MHz, avec une séquence générée selon la loi de Galois (voir figure 3.22)	75
Figure 0.2. Signal BPSK pulsé à 2,45GHz, avec une séquence générée selon la loi de Galois.....	76
Figure 0.3. Signal BPSK pulsé à 5,8GHz, avec une séquence générée selon la loi de Galois.....	76

Liste des tableaux

Tableau 1.1. Quelques types de codes à barres et leurs domaines d'application .	5
Tableau 1.2. Comparaison des différents systèmes RFID montrant leurs avantages et inconvénients	8
Tableau 2.1. Résumé des règlements sur les fréquences UHF et micro-ondes .	20
Tableau 3.1. Signal BPSK pulsé, $T_{On}=80ns$, $T_{Off}=160ns$, $f_c = 2,45$ GHz, séquence générée selon la loi de Galois	62
Tableau 3.2. $f_c = 2,45$ GHz, séquence générée selon la loi de Galois	62

Liste des abréviations

μs	Microseconde (10^{-6} s)
ASK	Modulation par déplacement d'amplitude (<i>Amplitude Shift Keying</i>)
B	Largeur de bande
BER	Taux d'erreur binaire (<i>Bit Error Rate</i>)
BNC	Bayonet Neill–Concelman (câble ou connecteur)
BPSK	Modulation de phase à 2 états (<i>Binary Phase-Shift Keying</i>)
C	Capacitance d'un condensateur
CEPT	Comité Européen des Postes et Télécommunications
CLK	Clock (signal de synchronisation)
CRC	Somme de contrôle de redondance cyclique (<i>Cyclic Redundancy Checksum</i>)
CRTC	Conseil de la Radiodiffusion et des Télécommunications Canadiennes
dBm	Mesure logarithmique de la puissance, liée à une puissance HF de 1mW (0 dBm = 1mW, 30 dBm = 1W)
DSSS	Spectre étalé à séquence directe (<i>Direct Sequence Spread Spectrum</i>)
DSB	Bande latérale double (<i>Double Side Band</i>)
EAN	Numéro européen des articles (<i>European Article Number</i>)
EAS	Article électronique de surveillance (<i>Electronic Article Surveillance</i>)
EDI	Échange de documents électroniques (<i>Electronic Document Interchange</i>)
EIRP	Équivalent isotopique de puissance radiée (<i>Equivalent Isotropic Radiated Power</i>)
EPC	Code électronique des produits (<i>Electronic Product Code</i>)
EPCIS	EPC Information Services
ERP	Puissance rayonnée équivalente (<i>Equivalent Radiated Power</i>)
FCC	Federal Communications Commission (USA)
FHSS	Étalement de spectre par saut de fréquence (<i>Frequency Hopping Spread Spectrum</i>)
FM	Modulation de Fréquence (<i>Frequency Modulation</i>)
FSK	Modulation par déplacement de fréquence (<i>Frequency Shift Keying</i>)
GCN	Numéro mondial des coupons (<i>Global Coupon Number</i>)

GDTI	Identifiant mondial du type d'un document (<i>Global Document Type Identifier</i>)
GIAI	Identifiant mondial d'actif individuel (<i>Global Individual Asset Identifier</i>)
GINC	Numéro mondial d'identification pour consignation (<i>Global Identification Number for Consignment</i>)
GLN	Numéro international pour la localisation (<i>Global Location Number</i>)
CPID	Identifiant des composants (<i>Component/Part Identifier</i>)
GRAI	Identifiant mondial des actifs à retourner (<i>Global Returnable Asset Identifier</i>)
GSIN	Numéro mondial d'identification de l'expédition (<i>Global Shipment Identification Number</i>)
GSRN	Numéro mondial de relation de service (<i>Global Service Relation Number</i>)
GTIN	Numéro mondial des articles de commerce (<i>Global Trade Item Number</i>)
HF	Haute Fréquence (<i>High Frequency</i> , 3–30MHz)
IAN	Numéro international des articles (<i>International Article Numbers</i>)
IC	Circuit intégré (<i>Integrated Circuit</i>)
ID	Identification/Identifiant
IDT	Transducteur interdigital
IF	Fréquence intermédiaire (<i>Intermediate Frequency</i>)
IFF	Identifier amis ou ennemis (<i>Identify Friend or Foe</i>)
IoT	Internet des Objets (<i>Internet of Things</i>)
ISM	Industrielle Scientifique Médicale (Plage de fréquence)
ISO	International Organization for Standardization
LF	Basse Fréquence (<i>Low Frequency</i> , 30–300 kHz)
NF	Figure de bruit (<i>Noise Figure</i>)
NFC	Communication de proximité (<i>Near Field Communication</i>)
NRZ	Codage sans retour au zéro (<i>Non-Return-to-Zero</i>)
OCR	Reconnaissance Optique des caractères (<i>Optical Character Recognition</i>)
PR	Inversion de phase (<i>Phase Reversal</i>)
PSK	Modulation par déplacement de phase (<i>Phase Shift Keying</i>)
PXI	PCI eXtensions for Instrumentation

RADAR	Radio Detection And Ranging
RAM	Mémoire à accès aléatoire (<i>Random Access Memory</i>)
RCS	Surface équivalente radar (<i>Radar Cross-Section</i>)
RFID	Identification par radio-fréquence (<i>Radio Frequency Identification</i>)
RTLS	Système de localisation en temps réel (<i>Real-Time Localisation System</i>)
SAW	Onde acoustique de surface (<i>Surface Acoustic Wave</i>)
SDR	Radio logicielle (<i>Software Defined Radio</i>)
SNR	Rapport signal à bruit (<i>Signal to Noise Ratio</i>)
SMA	Câble coaxial semi-précision (<i>SubMiniature version A</i>)
SRAM	Mémoire statique à accès aléatoire (<i>Static Random Access Memory</i>)
SSB	Bande latérale unique (<i>Single Side Band</i>)
SSCC	Numéro de série du conteneur d'expédition (<i>Serial Shipping Container Code</i>)
UHF	Très haute fréquence (<i>Ultra-high frequency</i> , 300 MHz – 3 GHz)
UPC	Universal Product Code
WORM	Non réinscriptible (<i>Write Once Read Many</i>).
WLAN	Un réseau local sans fil (<i>Wireless Local Area Network</i>)
WORM	Écrire et lire plusieurs fois (<i>Write Many Read Many</i>)
XOR ou	Ou exclusif (<i>Exclusive OR</i>)
EXOR	

CHAPITRE 1 INTRODUCTION GENERALE DES SYSTEMES D'IDENTIFICATION AUTOMATIQUE

1.1 DEFINITION

L'identification automatique (Auto-ID) des objets est un ensemble de procédures permettant de fournir des informations sur des biens et produits en transit, des animaux, voire des humains. Dépendamment des phénomènes physiques mis en jeu pour la capture et le stockage des données, un système d'identification automatique peut être avec ou sans contact direct entre l'identifiant et l'identifié. La technologie de base s'appuie sur les propriétés soit optique, électromagnétique ou piézoélectrique, etc. des matériaux.

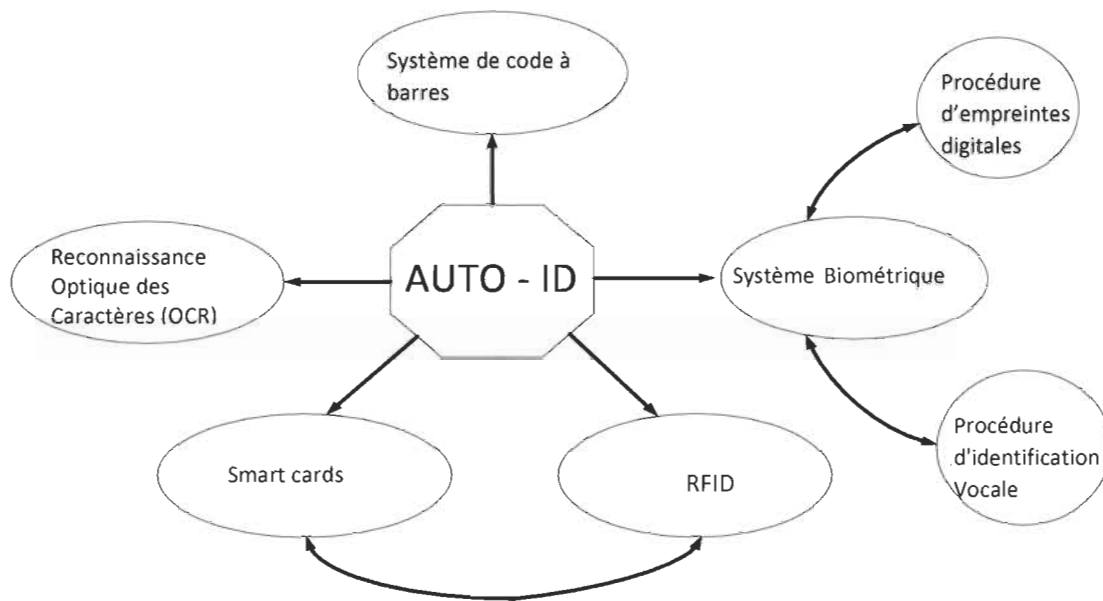


Figure 1.1. Types de systèmes d'identification automatique[1]

1.2 TYPES DE SYSTEMES D'IDENTIFICATION AUTOMATIQUE (AUTO-ID)

Dans ce passage, nous donnons un aperçu général sur les systèmes d'identification automatique en mettant un peu plus d'accent sur les codes à barres (ancêtres des Auto-ID) et les technologies d'identification par radiofréquence (RFID). Ces dernières étant l'objet de nos recherches.

1.2.1 Le système de code à barres

Le code à barres est un code binaire comportant un champ de barres et espaces disposés selon une configuration parallèle. Ils sont disposés selon un motif prédéterminé et représentent des

éléments de données qui font référence à un symbole associé. La séquence, constituée de barres et d'espaces larges et étroits, ne peut être interprétée numériquement et alphanumériquement [1]. Elle est lue par balayage au laser optique, i.e. par la différence de réflexion d'un faisceau laser à partir de barres noires et des espaces blancs. Les informations complémentaires et lisibles par l'humain sont généralement mentionnées sur la partie inférieure des étiquettes de code à barres (voir figure 1.2).

Les premiers travaux de standardisation des codes à barres ont commencé par [2]. Les appellations UPC (*Universal product Codes*) et EAN (*European Article Numbers*) aussi connu sous le nom IAN (*International Article Numbers*) ont été adoptées. Instantanément reconnaissable, la famille de codes à barres EAN/UPC domine le marché mondial. Elle a transformé le monde du commerce de détail. UPC et EAN sont identiques à une exception près au niveau d'emplacement des caractères lisibles par humain, lesquels sont généralement numériques et placés en bas du code pour servir de secours au cas où le code-barres ne scanne pas correctement et que l'information doit être entrée manuellement dans le système de point de vente (voir figure 1.3).





Famille	UPC-A	EAN-13	UPC-E	EAN-8
	 6 14141 00003 6	 9 501101 530003	 0 614193 9	 9505 0003
Capacité	12 Numériques	13 Numériques	12 Numériques, zéros supprimés.	8 Numériques
Omni-Directionnel ?	Oui	Oui	Oui	Oui
Attributs ?	Aucun	Aucun	Aucun	Aucun

Figure 1.2. Familles UPC/EAN avec leurs spécificités [3]

A nos jours, il existe plus d'une vingtaine de variétés de code à barres 1-D sur le marché [3],[4].

Les détails sur les caractères lisibles par l'humain et sur les symboles (barres) sont expliqués par la figure 1.3



Figure 1.3. Exemple de structure d'un code à barres (Universal Product Code) [3],[5]

Il est aussi possible de vérifier la validité d'un code à barres soit manuellement ou en se rendant à l'adresse <http://www.gs1.org/check-digit-calculator>.

Depuis 1966, l'année d'introduction commerciale de codes à barres 1-D, plusieurs recherches ont été menées en vue d'augmenter la capacité d'information par surface que peut supporter un scanner et ce, à une vitesse de lecture assez importante.

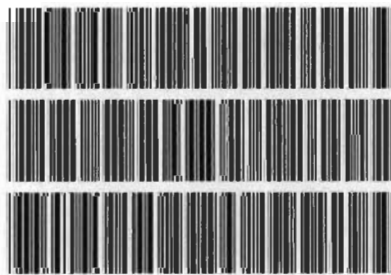


Figure 1.4. Code à barres 1-D à configuration multi codes

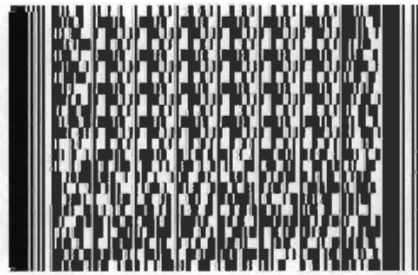


Figure 1.5. Code à barres 2-D empilées



Figure 1.6. Code 2-D matriciel (Quick response)

Contrairement aux codes à barres 1-D, le code 2-D a une disposition matricielle qui permet le transfert des informations non pas par la taille et la position des barres et des espaces dans une seule direction (horizontale), mais par l'arrangement de ses éléments sombres et clairs, appelés "modules" en colonnes et lignes, à savoir dans les deux directions horizontale et verticale [6]. Chaque module sombre ou clair, plus petite instance spécifique d'un code, représente 0 ou 1, ce qui le rend intelligible par la machine. Le code QR est le plus populaire des codes 2-D. Les codes 2-D classiques perdent un temps considérable à déterminer l'angle

d'orientation, la position (coordonnées x et y) et la taille de la matrice. Le code QR a été conçu pour répondre à cette problématique en introduisant des motifs spéciaux de détection de position situés dans trois coins de chaque symbole. Les motifs ont un rapport symétrique de balayage de 1: 1: 3: 1: 1, ce qui leur permet d'être scannés dans toutes les directions de 360 degrés (voir figure 1.7). La correction d'erreur est assurée en ajoutant au code QR des codes de Reed-Solomon; une méthode mathématique de correction d'erreur largement utilisée [3]. Cela permet à un symbole de code QR d'être lu même s'il est sale ou endommagé.

Sous les exigences [ISO/IEC 18004:2015](#), un code QR peut être généré en 40 versions différentes de symboles de 21 x 21 modules (version 1), 25 x 25 modules (version 2) jusqu'à 177 x 177 modules (version 40). Actuellement, il existe plusieurs sites web générateurs (gratuits) de code QR dont <http://www.qr-code-generator.com/>. Le scan est fait par les smartphones et les scanners QR. L'information codée peut être du texte, URL, un ticket électronique, les informations de paiement électronique, etc.

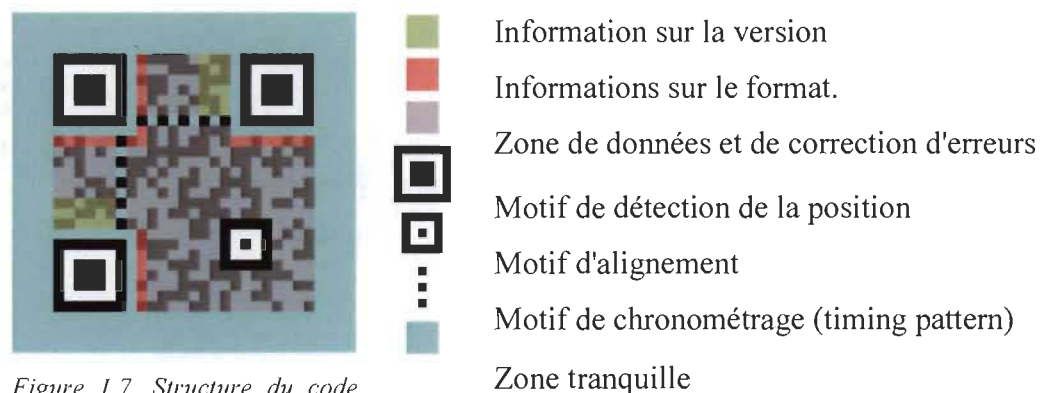


Figure 1.7. Structure du code QR [6]

(Source : <https://www.nationwidebarcode.com/tag/codabar/>)

Les figures et tableau suivants donnent un aperçu général sur le principe et les différents types du système de code à barres. Typiquement, un système code à barres est composé d'une imprimante qui produit des étiquettes de code à barres et un scanner qui permet de les lire.



Figure 1.8. Exemple d'imprimante de code à barres

(Source : <https://www.barcodesinc.com>)



Figure 1.9. Exemple de scanner de code à barres

(Source : <http://www.eposnow.com>)

Tableau 1.1. Quelques types de codes à barres et leurs domaines d'application

Code	Applications typiques
Code Codabar	Applications médicales / cliniques, des secteurs à haute exigence en matière de sécurité
Code 2/5 entrelacé	Industrie automobile, le stockage des marchandises, des palettes, des conteneurs maritimes et l'industrie lourde
Code 39	Traitement de l'industrie, de la logistique, les universités et les bibliothèques

1.2.2 Le système de reconnaissance optique des caractères (OCR)

Un système de reconnaissance optique de caractères ou OCR, est une technologie qui permet de lire et/ou convertir différents types de documents, tels que les documents papier numérisés, des fichiers PDF ou des images capturées par un appareil photo numérique en données modifiables et interrogeables. L'avantage le plus important des systèmes OCR est la haute densité d'informations et la possibilité de lire des données visuellement en cas d'urgence, ou tout simplement pour vérifier. Aujourd'hui, OCR est utilisé dans la production, le service et les domaines administratifs, ainsi que dans les banques pour enregistrer des chèques [1], [7]. Le grand inconvénient de cette technologie est au niveau du coût d'achat élevé de son scanner.

1.2.3 Procédures d'identification biométrique

La biométrie est définie comme la science du comptage et des procédures (corps) de mesure impliquant les êtres vivants. Dans le contexte des systèmes d'identification, la biométrie est le terme général pour toutes les procédures qui permettent d'identifier les personnes en

comparant les caractéristiques physiques indéniables et individuelles [1]. En pratique, il s'agit des empreintes digitales (dactyloscopie), les manières d'écriture à la main, l'identification de la voix et, moins fréquemment, de la rétine (ou d'iris).

1.2.3.1 Procédures d'empreintes digitales

Les techniques d'identification par empreinte digitale sont beaucoup utilisées en criminologie et aux procédures d'entrée (accès), le bout du doigt est placé sur un lecteur spécial. Le système calcule un enregistrement de données à partir du motif qu'il a lu et compare celui-ci avec un motif de référence stocké. Les systèmes d'empreintes digitales modernes nécessitent moins d'une demi-seconde à reconnaître et à vérifier une empreinte digitale tout en détectant si le doigt posé est celui d'une personne vivante ou non (Schmidhausler, 1995).

1.2.3.2 Procédures d'identification vocale et rétinienne

Plus récentes, ces deux procédures d'identification biométriques sont aussi efficaces que celle d'empreinte digitale. Dans le cas du premier système, l'utilisateur parle dans un microphone lié à un ordinateur. Cet équipement convertit ses paroles en signaux numériques, qui sont alors évalués par un algorithme de reconnaissance vocale. Les spécificités fréquentielles de la voie de l'individu sont alors enregistrées dans une base de données des références vocales. Ainsi, à l'aide d'un haut-parleur de vérification (reconnaissance du locuteur), la voie du locuteur est comparée à celles préenregistrées dans la base de données.

La procédure d'identification rétinienne utilise la même approche, mais nécessite un volume de stockage des données beaucoup plus inférieur.

Les différences techniques d'identification biométriques peuvent être mises en commun dans certaines situations afin de renforcer la sécurité et/ou fournir des informations complémentaires recueillies sur un même sujet.

1.2.4 Les cartes à puce (smart cards)

Une carte à puce, comme son l'indique, est faite de circuit intégré incorporé dans une carte qui comporte des composants pour la transmission, le stockage et le traitement des données. Les données peuvent être transmises en utilisant soit des contacts sur la surface de la carte ou les champs électromagnétiques, sans aucun contact. Les cartes à puce sont une alternative

aux cartes à bande magnétique et offrent une plus grande capacité de stockage de données [8].

L'un des avantages les plus importants de cartes à puce est que leurs données stockées peuvent être protégées contre l'accès et la manipulation non autorisée. Étant donné que les données ne sont accessibles que par l'intermédiaire d'une interface série qui est commandée par un système d'exploitation et une logique de sécurité, les données confidentielles peuvent être écrites sur la carte et stockées d'une manière qui les empêche d'être jamais lues depuis l'extérieur de la carte.

1.2.5 IDentification par Radio-Fréquence (RFID)

Les systèmes RFID et les cartes à puce ont en commun le même processus de stockage des données sur un dispositif de support de données électroniques - le transpondeur. Cependant, contrairement à la carte à puce, l'alimentation électrique du dispositif de support de données et l'échange de données entre celui-ci et le lecteur sont assurés au moyen des champs magnétiques ou électromagnétiques au lieu d'utilisation de contacts galvaniques [1]. La procédure technique sous-jacente provient des domaines de la radio et de l'ingénierie de radar. Dépendamment de la procédure d'alimentation du tag RFID, le système RFID est dit actif ou passif. Cette technologie se démarque par rapport aux mécanismes traditionnels d'identification (comme les codes-barres par exemple) et présente les avantages suivants :

- a. Les étiquettes RFID passives peuvent être lues à des distances beaucoup plus grandes que les codes-barres ;
- b. Il n'y a pas lieu de maintenir une ligne de vue entre le lecteur et l'étiquette ;
- c. Plusieurs étiquettes peuvent être lues simultanément et à une vitesse (débit) plus élevée que les codes-barres ;
- d. Les étiquettes RFID ont beaucoup plus de mémoire que les codes à barres qui permet de stocker beaucoup plus d'informations que simplement l'ID ;
- e. Et les informations contenues dans l'étiquette RFID peuvent être modifiées dynamiquement en utilisant l'interrogateur [9].

Le tableau suivant fait une comparaison récapitulative entre les différents systèmes d'auto-identification.

Tableau 1.2. Comparaison des différents systèmes RFID montrant leurs avantages et inconvénients

Paramètres du système	Code à barres	OCR	Reconnaissance Vocale	Biométrie	Carte à puce	Système RFID
Quantité typique de données (bytes)	1 – 100	1 – 100	–	–	16 – 64 k	16 – 64 k
Densité des données	Faible	Faible	Élevée	Élevée	Très élevée	Très élevée
Lisibilité par machine	Bien	Bien	Chère	Chère	Bien	Bien
Lisibilité par humain	Limitée	Simple	Simple	Difficile	Impossible	Impossible
Influence de la saleté / humide	Très élevée	Très élevée	–	–	Possible	Non Influente
Influence de couverture (optique)	Echec total	Echec total	–	Possible	–	Non Influente
Influence de direction et position	Faible	Faible	–	–	Unidirectio	Non Influente
Dégradation / usure	Limitée	Limitée	–	–	Contacts	Non Influente
Coût d'achat/lecture électronique	Très faible	Moyen	Très élevée	Très levée	Faible	Moyen
Coûts d'exploitation (exp. imprimante)	Faible	Faible	Non	Non	Moyen (contacts)	Non
Non autorisée (copie / modification)	Léger	Léger	Possible* (bande audio)	Impossible	Impossible	Impossible
Vitesse de lecture (y compris la manutention du support de données)	Faible ~5s	Faible ~3s	Très faible > 5 cm	Très faible > 5–10s	Faible ~4s	Très rapide ~0.5s
Portée maximale de lecture	0 – 50 cm	<1 cm scanner	0 – 50 cm	Contact direct	Contact direct	0 – 5m, micro onde

CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE DES SYSTEMES RFID

2.1 PETIT RAPPEL HISTORIQUE

Ce chapitre présente les différents types de technologies RFID actuellement disponibles et ce, en faisant ressortir les hypothèses purement théoriques de celles réalisables. Les réglementations nationales ou internationales sur les puissances et fréquences (LF, HF, UHF, micro-onde) y sont discutées. Il y est également question d'un aperçu sur les principes physiques du transpondeur et les impacts environnementaux en rapport avec l'intégrité des données.

Comme introduite ci-haut, l'IDentification par RadioFréquence (RFID) est une méthode d'identification automatique se reposant sur le stockage et la récupération à distance des données aux moyens des dispositifs appelés étiquettes ou transpondeurs RFID. Une étiquette RFID est un petit objet qui peut être attaché ou incorporé dans un produit, un animal ou une personne. Les étiquettes RFID contiennent des antennes pour leur permettre de recevoir et de répondre aux requêtes radio fréquence à partir d'un lecteur RFID ou un interrogateur. Contrairement aux étiquettes actives, lesquelles sont munies d'une source d'alimentation interne, les étiquettes passives n'en nécessitent aucune pour fonctionner.

Inventée en Angleterre sous le nom IFF (*Identify Friend or Foe*) et utilisée en 1939 par des alliés, la RFID a parcouru environ trois décennies pour passer à l'étape de commercialisation grand public.

La première publication scientifique dans ce domaine fut l'œuvre de Harry Stockman intitulée "*Communication by Means of Reflected Power.*", en 1948. Cette technique de communication contrôlée par réflexion est appelée modulation par rétrodiffusion (*backscatter modulation*).

2.2 TERMINOLOGIES EN RFID

Cette section présente les terminologies RFID et leurs définitions au sein de la technologie RF.

Étiquette ou tag. Les tags sont semblables aux codes à barres optiques, qui sont attachés à l'élément à identifier et qui stockent un unique identifiant dit ID. Les tags sont également

appelés "émetteur-répondeurs (transpondeurs). Ils se composent principalement de deux éléments : l'antenne et la puce de circuit intégré. Dans certains cas, en fonction d'autres processus impliqués, ils peuvent servir ou être munis des capteurs environnementaux pour mesurer la température, l'humidité, et ainsi de suite.

Étiquettes passives. Elles sont passives parce qu'elles n'ont aucune source d'énergie embarquée pour leur fonctionnement. La puissance transmise par le lecteur est utilisée pour la mise sous tension de leur circuit et l'envoi du message de retour du tag au lecteur. Du coup, cette catégorie de tag a une haute exigence en termes de quantité d'énergie fournie par l'antenne du lecteur. Ces étiquettes sont généralement moins chères et ont une durée de vie théoriquement infinie. Cependant, pour une même fréquence d'opération, ces tags ont une portée de lecture assez limitée par rapport à celle des tags actifs ; environ 60,96 cm à 6,096 m [1], [9]–[17]. Lorsque l'étiquette passive ne communique pas avec un lecteur ou une avec une autre étiquette, elle est en état de "mort". A cet état, théoriquement elle ne contribue pas à la formation des signaux radio du milieu environnant. Pour cette raison, les étiquettes passives s'adaptent peu à des situations où elles doivent supporter des capteurs environnementaux embarqués pour la mesure de la température, de l'humidité, etc.

Étiquettes semi-passives ou Battery Assisted Tags (BATs). Les BATs ont une source d'alimentation à bord pour alimenter et maintenir en vie leur circuit intégré (IC), mais ne portent aucun émetteur. Ainsi, ils communiquent avec le lecteur par un couplage de rétrodiffusion. La portée de lecture peut aller jusqu'à 30,48 m. En maintenant l'IC en vie (c.-à-d. alimenté tout le temps), les BATs peuvent supporter les capteurs environnementaux dans les processus impliquant le contrôle de température (aliments congelés, transfusion sanguine), et ainsi de suite. En raison de l'absence de tout émetteur actif, ces balises ne contribuent pas à formation du bruit radio. En contrepartie d'un coût d'achat relativement plus élevé, ces tags ont une plus grande capacité de mémoire que les étiquettes passives. Un inconvénient majeur d'une étiquette semi-passive est le fait que la durée de vie de l'étiquette est déterminée par la durée de vie de la batterie. En outre, dans certaines conditions environnementales difficiles, la batterie peut ne pas fonctionner, rendant ainsi l'étiquette pratiquement morte dans cet environnement [18].

Étiquettes actives. Cette catégorie de tag est dite active parce qu'elle porte une source interne d'énergie (batterie) et un émetteur. La batterie fournit de l'énergie à la fois au circuit intégré et l'émetteur. En raison de la présence d'un émetteur, il n'est pas nécessaire de passer par couplage par rétrodiffusion pour transmettre les données. En fait, ce type de tag agit comme étant lui-même un interrogateur [9]. Il offre la plus longue distance de lecture pouvant atteindre des kilomètres, en fonction de la batterie et l'émetteur. Plusieurs recherches sont menées pour rallonger la durée de vie des tags actifs, notamment en les mettant automatiquement en mode repos ou réveil selon les besoins et en intégrant un système d'alerte automatique sur une décharge imminente de leur batterie. Ces étiquettes peuvent accepter localement des données provenant d'autres étiquettes/capteurs, les traiter, puis les diffuser (par exemple, les nœuds de communication du protocole Zigbee). Ce qui fait leur force dans le processus de localisation en temps réel (RTLS) et au concept d'Internet des Objets (*Internet of Things - IoT*) [10].

Cependant, il s'agit aussi du type de tag RFID le plus cher sur le marché. En raison de la présence d'un émetteur embarqué, ces étiquettes contribuent en grande partie au bruit radio [18].

Lecteur ou Interrogateur. Le lecteur RFID est l'équivalent électromagnétique du scanner des codes à barres optiques. Il existe sous différentes formes telles que l'ordinateur de poche, mobile, ou stationnaire. Les lecteurs sont essentiellement constitués de deux éléments : l'antenne et le circuit d'interrogation. L'antenne est utilisée pour la communication avec le tag en utilisant des ondes électromagnétiques. Pour les tags semi passifs et passifs, l'antenne du lecteur sert de voie d'alimentation en énergie nécessaire au fonctionnement du circuit du tag. Le circuit d'interrogateur exécute la tâche d'envoi/réception de données via son antenne, et la retransmission des données reçues à l'extrémité arrière pour le traitement [1], [7], [11], [12], [19], [20]. Le circuit de d'interrogateur effectue également la tâche de coordination entre les différentes antennes du lecteur pour assurer une lecture efficace des tags.

Zone d'Interrogation (IZ). La zone d'interrogation se compose de la zone dans laquelle le lecteur lit ou écrit des données depuis/vers un tag. En d'autres termes, c'est l'espace physique tridimensionnel envoisinant l'étiquette et le lecteur, où se déplacent les ondes électromagnétiques (EM). IZ est incluse dans la couche physique parce que la réussite de la

communication entre l'étiquette et le lecteur est fortement dépendante des interférences provenant d'autres sources électromagnétiques, réflexion des ondes, la présence d'autres objets stationnaires ou mobiles dans la zone et ainsi de suite. La nature de IZ est principalement déterminée et affectée par les ondes RF présentes dans la zone [21].

Portée de lecture (*Range*). Elle n'est pas à confondre avec IZ. La portée de lecture d'un système RFID est la distance (maximale) à laquelle un transpondeur RFID présent dans l'IZ du système (transpondeur-lecteur) peut être correctement lu par le lecteur. Elle dépend de :

- la précision de la position du transpondeur ;
- la distance minimale entre plusieurs transpondeurs en fonctionnement pratique ;
- la vitesse du transpondeur dans la zone d'interrogation (IZ) du lecteur [1].

Fréquences disponibles. Pour la technologie RFID, en vertu des normes, des règlements et des mandats, seules certaines parties du spectre EM sont disponibles pour utilisation. Il existe trois principales variétés d'étiquettes RFID en usage présentement. Elles fonctionnent toutes dans la bande Industrielle (basse fréquence), Scientifique (haute fréquence) et Médicale (ISM-ultra haute fréquence). La conception d'un système RFID doit être conforme aux fréquences suivantes :

- Basse fréquence (LF) : 125-134 kHz

En raison des propriétés électromagnétiques à basses fréquences, les étiquettes RFID fonctionnant à ces fréquences peuvent être lues tout en étant attachées à des objets contenant de l'eau, les tissus animaux, le métal, le bois, et les liquides [18]. Elles ne conviennent que pour des applications de proximité (*Near-Field Coupling*), car la portée de lecture maximale est seulement d'ordre de quelques centimètres.

Les étiquettes basses fréquences ont le plus faible taux de transfert de données parmi toutes les fréquences RFID et ne peuvent stocker qu'une quantité réduite de données (~ 1Ko). Elles ont également des capacités de gestion d'anticollision très limitées, ce qui rend difficile, voire souvent impossible, la lecture simultanée de plusieurs étiquettes.

En raison des propriétés et contraintes susmentionnées, les tags basses fréquences sont bien adaptés pour des applications spécifiques telles que le contrôle d'accès, le

suivi des actifs, l'identification des animaux, le contrôle de l'automobile, immobilisation du véhicule, des soins de santé, ainsi que diverses applications dans les points de ventes [1], [8], [13], [18], [7], [22].

- Haute fréquence (HF) : 13,56 MHz

Leurs principes de fonctionnement sont similaires aux ceux des étiquettes basses fréquences mais présentent une meilleure plage de lecture que celles-ci. Elles ont un meilleur taux de transfert de données et une plus grande taille de mémoire (jusqu'à 4 Ko). Les tags HF peuvent avoir une capacité anticollision qui facilite d'en lire plusieurs simultanément dans la zone d'interrogation (IZ).

Ces raisons font de ces systèmes un choix idéal pour des applications telles que les cartes de crédit, les cartes à puce, étiquettes de livres de bibliothèque, étiquettes des bagages (compagnie aérienne), et le suivi des biens. C'est la catégorie RFID la plus utilisée à nos jours.

- Ultra-haute fréquence (UHF) : 433 MHz et 860 - 960 MHz

La fréquence 433 MHz est utilisée pour les étiquettes UHF actives, tandis que la gamme 860 - 960 MHz est principalement utilisée pour les étiquettes passives. Contrairement aux étiquettes LF et HF, les étiquettes et les interrogateurs UHF utilisent un champ de couplage lointain ou couplage par rétrodiffusion (*far-field coupling* or *backscatter coupling*) pour communiquer entre eux. Par conséquent, dans de bonnes conditions, la portée de lecture des tags UHF actifs peut aller jusqu'à 20m. Tous les protocoles de la gamme UHF ont un certain type de capacité d'anticollision, permettant ainsi une lecture multiple et simultanée.

Cependant, la performance des tags UHF est gravement dégradée lorsqu'il est attaché à des objets contenant de l'eau, des tissus biologiques, et des métaux. Leur proximité avec ces matériaux dégrade leur efficacité par absorption et provoque des dysfonctionnements. En conséquence, les tags UHF ne peuvent pas être lus correctement si l'eau ou tout autre matériau conducteur est placé entre l'antenne de l'interrogateur et les étiquettes[18], [22].

- Micro-ondes : 2,4 GHz et 5,8 GHz

Les étiquettes fonctionnant à ces fréquences (2,4 GHz et 5,8 GHz bande ISM) sont physiquement les plus petites en taille, en raison de leur longueur d'onde. Dans cette

gamme de fréquences, les tags peuvent être passifs, semi-passifs ou actifs. La portée de lecture pour les étiquettes passives est d'environ 6,1m, les semi-passives sont autour de 30,48m, et celle pour les actives autour de 106,68m [18]. Pour les tags de cette catégorie, les antennes sont plus directionnelles, ce qui aide à une meilleure définition de l'IZ. Ces sont des tags qui ont une grande tolérance aux présences des objets métalliques en raison de leur longueur d'onde plus courte. L'humidité (l'eau) peut également impacter leur bon fonctionnement. L'existence d'une large plage de fréquences disponibles permet l'utilisation de plusieurs canaux, ce qui rend efficace la lecture et l'implémentation des algorithmes anticollision. Il y a lieu de noter qu'il existe d'autres dispositifs à micro-ondes tels que WLAN, téléphones sans fil, les fours à micro-ondes, etc. En RFID, ce spectre s'adapte bien à des systèmes de péage sur les autoroutes, l'identification de la flotte et les systèmes de localisation en temps réel.

Interférence. On parle d'interférence lorsque deux ou plusieurs ondes ayant des caractéristiques d'onde différentes se combinent pour donner une toute nouvelle et différente onde [23], [24].

Réflexion. Tout comme en optique, en RFID on parle de réflexion lorsque l'onde croise et reflète sur des objets assez vastes (grands) par rapport à sa longueur d'onde placés sur sa trajectoire. Les métaux sont des très bons réflecteurs, alors que les metalloïdes (diélectriques) laissent passer l'onde après une certaine perte en quantité d'énergie.

Diffraction. Sur leur chemin de propagation, il est possible qu'une onde radio rencontre un objet pointu qui la fléchit et/ou dévie de sa trajectoire initiale. Ce phénomène est appelé diffraction.

Réfraction. Lorsque les ondes radio se déplacent d'un milieu à un autre milieu de densité différente (des diélectriques), leurs vitesses changent suivant leurs directions de propagation. Ce phénomène est dit réfraction.

Diffusion. Dans le cas où se situent sur la trajectoire de l'onde des objets plus petits par rapport à sa longueur d'onde, la présence d'autres objets assez grands sur cette même trajectoire provoque une dispersion (diffusion) des ondes radios dans toutes sortes de directions. Ce phénomène est appelé diffusion ou dispersion.

Multi-chemin (multipath). Quand une onde se propageant empreinte des chemins différents et après des phénomènes tels que les interférences, les réflexions, et ainsi de suite, se reforme en différentes phases, il se crée des zones sans précédentes dans l'espace où les ondes sont fortes et faibles par rapport à l'onde d'incidence initiale.

Fading. Lorsque l'amplitude du signal radio varie dans le temps, il est appelé "fading". Ce phénomène est tout à fait aléatoire dans la nature et dépendant de tous les phénomènes mentionnés ci-dessus et, par conséquent, il est très difficile à prévoir. Les fadings ne sont pas pris en compte lors de la conception d'un système RFID.

Onde continue. Typiquement, une sinusoïde à une fréquence donnée, mais plus généralement toute forme d'onde d'interrogation apte à alimenter une étiquette passive, sans amplitude et/ou modulation de phase d'une amplitude suffisante pour être interprété par une étiquette comme des données transmises.

Couverture de codage. Procédé par lequel un interrogateur cache des informations qu'il transmet à un tag. Pour couvrir des données ou un mot de passe, un interrogateur demande d'abord au tag un nombre aléatoire. L'interrogateur effectue ensuite un EXOR de bit à bit des données ou mot de passe avec ce nombre aléatoire, et transmet la chaîne de couverture codée au tag. Le tag découvre les données ou le mot de passe en effectuant une EXOR de bit à bit de la chaîne de couverture codée avec le nombre aléatoire d'origine.

GS1 EPCglobal application™. Une application dont l'utilisation représente une acceptation des normes et politiques GS1 EPCglobal™ (voir non-GS1 EPCglobal application™).

EPCIS (Electronic Product Code Information Services). La norme EPCIS fournit les bases nécessaires à la capture, la communication et la diffusion des données EPC sur des biens et services produits. La norme EPCIS comprend un ensemble d'interfaces (capture et d'interrogation) pour l'obtention et le partage de données sur les objets et services uniques, tant au sein des organisations.

EPCIS offre de nouvelles capacités importantes pour améliorer l'efficacité, la sécurité et la visibilité de la chaîne d'approvisionnement. Il est une norme de neutralité technologique de l'industrie neutre qui est conçu pour tenir dans les environnements d'entreprise et de sécurité

existants, et en tant que tel, il est un complément, pas un remplacement pour les systèmes d'information existants de l'entreprise.

Modulation et codage. Pour la communication dans la technologie RFID, les fréquences mentionnées ci-dessus sont les fréquences porteuses. Les données sous forme binaire sont encodées dans les ondes électromagnétiques aux fréquences porteuses, au moyen des techniques de modulation. Les tags utilisant le signal de rétrodiffusion fonctionnent en modulation ASK (DSB-ASK, SSB-ASK, PR-ASK) et/ou PSK (BPSK, QPSK...etc.). Le fabricant de tag sélectionne le format de modulation. Les interrogateurs sont capables de démoduler les deux types de modulation. L'onde modulée est ensuite transmise, reçue, puis décodée pour récupérer les données qu'elle transporte. Les codages les plus utilisés sont NRZ et Manchester [1].

Couche physique. Le codage de données et la modulation des formes d'onde utilisés en transmission Interrogateur -Tag et Tag - Interrogateur.

Protocole. Collectivement, une couche physique et une spécification de la couche d'identification du tag.

Q. Un paramètre qu'un interrogateur utilise pour réguler la probabilité de réponse du tag. Un Interrogateur instruit les tags dans un cycle d'inventaire pour charger un Q-bit nombre aléatoire (ou pseudo-aléatoire) dans leur compteur d'intervalles ; l'interrogateur peut également commander des tags pour décrémenter leur compteur d'intervalles. Les tags répondent lorsque la valeur de leur compteur d'intervalles (à savoir leur emplacement) est égale à zéro. Q est un nombre entier dans l'intervalle (0-15) ; les probabilités de réponse du tag correspondant vont de $2^0 = 1$ à $2^{-15} = 0,000031$.

La figure 2.1 montre un exemple d'algorithme qu'un interrogateur peut utiliser pour régler la fente de comptage du paramètre Q dans une commande de requête. Q_{fp} est une représentation en virgule flottante de Q ; un interrogateur arrondit Q_{fp} à une valeur entière et substitue cette valeur entière pour Q dans la requête. Les valeurs typiques pour Δ sont de $0,1 < \Delta < 0,5$. Un Interrogateur utilise généralement des petites valeurs de Δ lorsque Q est grand et plus grandes valeurs de Δ lorsque Q est faible [25].

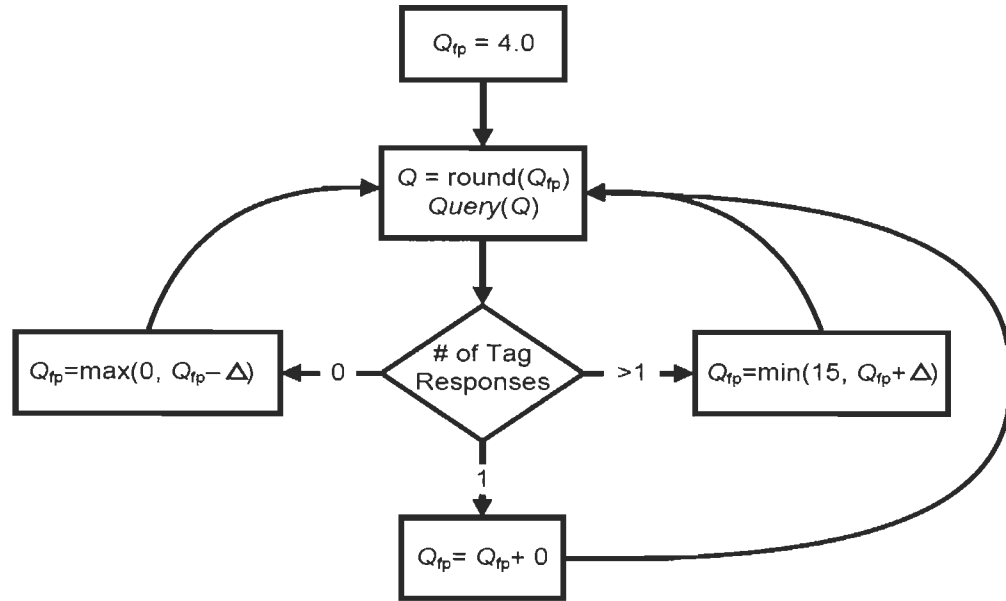


Figure 2.1. Exemple d'algorithme pour choisir le paramètre Q d'emplacement de comptage

Tari. Référence intervalle de temps pour un data-0 dans la transmission Interrogateur à Tag. Le mnémonique "Tari" dérive de la spécification ISO/CEI 18000-6 (partie A), où Tari est une abréviation de *Type A Reference Interval*.

Champ proche/Couplage Inductif (Near-Field/Inductive Coupling). Le couplage est essentiellement le transfert d'énergie électromagnétique d'un support (lecteur/tag) à l'autre support (tag/lecteur). Le *champ proche* est l'espace en trois dimensions entourant une antenne où l'onde plane n'est pas encore pleinement développée et séparée de l'antenne. La répartition du *champ proche* est assez omnidirectionnelle, et la puissance est atténuée à la puissance six de la distance d à partir de l'antenne $\left(\propto \frac{1}{d^6}\right)$. Ceci est essentiellement un transfert d'énergie à travers le champ magnétique partagé et donc l'opération est limitée à seulement aux étiquettes RFID fonctionnant aux fréquences LF et HF. La longueur d'onde doit être beaucoup plus grande que l'antenne et la zone d'interrogation (IZ), et un changement de courant dans un dispositif induit la circulation du courant dans l'autre appareil d'une manière "push-pull"[1], [18].

Champ lointain / Couplage par rétrodiffusion (Far-Field/Backscatter Coupling). La zone dans l'espace à trois dimensions au-delà du *champ proche* est appelé « champ lointain », et la communication entre l'étiquette et le lecteur a lieu grâce au couplage par rétrodiffusion

du rayonnement électromagnétique (EM). Dans ce cas, l'énergie EM est transmise en continu "loin" de l'antenne de manière radiale et sa puissance est proportionnelle au carré inverse de la distance par rapport à l'antenne $\left(\propto \frac{1}{d^2}\right)$. Ce type de communication est très répandue dans les UHF et la gamme micro-ondes fréquence d'étiquettes RFID passives[18].

Saut de fréquence et d'allocation de canal (Frequency Hopping and Channel Allocation). Tout le fonctionnement des systèmes RFID est régi par les normes et règlements. Dans une IZ donnée, en raison des phénomènes physiques précités (interférences, multi-chemin, etc.), la communication serait très difficile à gérer au cas où plusieurs tags et lecteurs doivent opérer simultanément.

Pour pallier à de telles situations, les fréquences disponibles sont à nouveau subdivisées en spectres plus étroits appelés canaux. Il y a des règlements qui précisent le nombre de canaux pour toutes les gammes de fréquences particulières et la durée maximale d'allocation d'un canal à un lecteur particulier.

Afin de résister aux interférences radio, les méthodes d'étalement de spectre comme la technique de saut de fréquence sont utilisées. À cet effet, la technique d'étalement de spectre appelée DSSS (*Direct Sequence Spread Spectrum*) est de plus en plus rependue dans la technologie RFID [18].

Équivalente Isotrope Puissance Rayonnée et Équivalente Puissance Rayonnée (ERP et EIRP, en anglais). L'ERP et l'EIRP sont définies de manière similaire en tant que produit de la puissance fournie à l'antenne et le gain d'antenne (lorsque la puissance et le gain sont représentés en termes linéaires). La principale différence est que pour l'ERP le gain d'antenne est exprimée par rapport à une antenne idéale dipôle demi-onde, alors qu'avec l'EIRP le gain d'antenne est exprimée par rapport à un idéal (théorique) de l'antenne isotrope [26]. L'unité de l'ERP / EIRP est watts de dBm ($30 \text{ dBm} = 1 \text{ W}$). L'ERP et EIRP se réfèrent aux antennes lecteur/interrogateur. $2 \text{ W ERP} \approx 3,2 \text{ W EIRP}$, selon [27]. La réglementation nationale (Canada) est assurée par la *Canadian Radio-television and Telecommunications Commission (CRTC)*, laquelle exige une limite de 4 W EIRP sur une bande de $902 - 928 \text{ MHz}$ en technique de saut de fréquence FHSS [27].

Il est important que l'une et/ou l'autre soit mentionnée. L'ERP ou l'EIRP étant le produit de la puissance incidente et le gain, il est toujours conseillé d'avoir une antenne de gain plus élevé pour les deux raisons suivantes [18]:

- Réduire l'alimentation, qui est directement liée au coût de l'énergie et la durée de vie des composants.
- Lorsque le lecteur / interrogateur reçoit le signal rétrodiffusé, un gain plus élevé assurerait une meilleure qualité du signal et, par conséquent, un système plus précis.

2.3 STANDARDISATIONS DES SYSTEMES RFID

La standardisation (1) réduit les coûts et les risques du déploiement ; (2) permet aux fabricants d'avoir les mêmes processus de base pour tous les clients et vice versa ; (3) les produits de différents fournisseurs de solutions peuvent travailler ensemble ; (4) encourage la marchandisation de la solution qui entraîne la concurrence, l'amélioration des produits et réduire les coûts ; (5) réduit les risques et simplifie les décisions d'investissement.

Les deux normes RFID les plus pertinentes sont celles de l'Organisation Internationale de Standardisation ISO/IEC 18000 et les normes EPCglobal [28]. Ces normes ne sont pas en concurrence, et il est concevable que la norme EPCglobal pourrait éventuellement être adoptée dans une norme ISO. Les normes ISO/IEC 14443, ISO/IEC 15693 sont relatives à la carte à puce et les interfaces de cartes de proximité fonctionnant dans la gamme HF. Les principales normes qui encadrent le déploiement du système RFID sont les suivantes :

1. GS1 EPCglobal™: *GS1 EPC™ Tag Data Standard*
2. ISO/IEC 15961: *Information technology — Radio frequency identification (RFID) for item management — Data protocol: application interface*
3. ISO/IEC 15962: *Information technology — Radio frequency identification (RFID) for item management — Data protocol: data encoding rules and logical memory functions*
4. ISO/IEC 15963: *Information technology — Radio frequency identification for item management — Unique identification for RF tags*

5. ISO/IEC 18000-1: *Information technology — Radio frequency identification for item management — Part 1: Reference architecture and definition of parameters to be standardized*
6. ISO/IEC 18000-63 (UHF): *Information technology automatic identification and data capture techniques — Radio frequency identification for item management air interface — Part 63: Parameters for air interface communications at 860–960 MHz*
7. ISO/IEC 19762: *Information technology AIDC techniques – Harmonized vocabulary – Part 3: radio-frequency identification (RFID)*
8. ISO/IEC 29167-1: *Information technology — Automatic identification and data capture techniques — Part 1: Security services for RFID air interfaces*
9. ISO/IEC 15459-4 : *Information technology — Automatic identification and data capture techniques — Unique identification — Part 4 : Individual products and product packages*

2.4 SURFACE EQUIVALENCE RADAR (*Radar Cross Section*)

La RCS d'un objet est une grandeur physique qui mesure des impulsions radar, généralement par rapport à leur point d'origine. La RCS d'une cible est définie comme la zone d'interception d'une quantité efficace de la puissance incidente qui, lorsqu'elle est isotropiquement dispersée, produirait au niveau du radar une puissance réfléchie égale à celle de la cible. Cela dépend des facteurs tels que la forme de l'objet, le matériau, la longueur d'onde du signal et sa polarisation.

Tableau 2.1. Résumé des règlements sur les fréquences UHF et micro-ondes

Région	Game de fréquence	Puissance disponible
Europe ^a	869,4 – 869,65 MHz	0,5 W EPR
Europe ^a	2,400 – 2,4835 GHz	0,5 W EIPR extérieur
Europe ^a	2,400 – 2,4835 GHz	4 W EIRP intérieur
Europe ^b	865,5 – 867,60 MHz	2 W ERP
Amérique ^c	902,0 – 928,00 MHz	4 W EIRP
Amérique ^c	2,400 – 2,4835 GHz	4 W EIRP

^a Réglementations courantes (2008) CEPT/ETSI : CEPT REC 70-03 Annexe 1, ETSI EN 330 220-1.

^b Proposition de futurs règlements CEPT / ETSI.

^c Structures de réglementations FCC pour les USA et CRTC pour le Canada.

Ailleurs ^d	860,0 – 930,00 MHz	–
Ailleurs ^d	2,400 – 2,4835 GHz	–

La RCS (σ) est une fonction du coefficient de réflexion à l'interface entre l'antenne et le transpondeur. En ce sens, la RCS peut prendre une valeur comprise entre un minimum lorsque l'antenne est adaptée à la puissance de sa charge et un maximum lorsque l'antenne est soit en court-circuit ou en circuit ouvert [21].

$$\sigma_{\max} = \frac{\lambda^2}{4\pi} G_t \left|_{R_{ant,t} \rightarrow 0}^{R_{ant,t} \rightarrow \infty} \right. \quad (2-1)$$

$$\sigma_{\min} = 0 \left|_{R_{ant,t} \rightarrow R_s} \right.$$

Où G_t est le gain de l'antenne de la cible (tag RFID) et λ la longueur d'onde de la porteuse RF. $R_{ant,t}$ est la résistance (radiation et pertes) de l'antenne du transpondeur et R_s la résistance globale de l'antenne.

2.5 DIFFERENTES CATEGORIES D'IDENTIFIANTS

L'ISO/IEC 15459-4 (2014) spécifie une chaîne de caractères unique pour l'identification des produits individuels et des emballages de produits. La chaîne de caractères doit être encodée dans un système d'identification automatique pour répondre aux besoins de gestion.

La GS1 (Global Standards One), un organisme à but non lucratif, est l'organisation internationale qui travaille dans ce sens en développant et maintenant des normes (GS1 EPCglobal™, par exemple) pour les chaînes d'approvisionnement et de la demande dans de multiples secteurs. Elle a des organisations membres locales dans plus de 110 pays à travers le monde, dont GS1 Canada. Cette organisation définit 11 principaux identifiants (*GS1 Identification Keys*) en fonction de la nature du produit, des besoins d'emballage, d'expédition et de la localisation. EPC (Electronic Product Code) est une construction qui permet à tous les identifiants GS1 (notamment GTIN, SSCC, GLN, GRAI, GIAI) d'être encodés dans une étiquette RFID. Lesquels 11 principaux identifiants sont définis comme suit :

^d Plusieurs autres pays suivent les réglementations similaires à celles européennes ou américaines.

2.5.1 Identifiant d'article de commerce

GTIN (Global Trade Item Number ou Numéro international des articles de commerce, en français) peut être encodé dans un code à barres ou un tag EPC/RFID. En balayant l'étiquette de code à barres ou le tag EPC/RFID, les entreprises peuvent efficacement et précisément traiter des produits et des informations connexes ; par exemple, à vérifier dans un magasin lors de la réception des marchandises dans un entrepôt, et lors de l'administration des médicaments dans un hôpital. Le GTIN est supporté par EAN-8, UPC-A, UPC-E, EAN-13, GS1-128, etc... Combiné avec des attributs du produit tels que le numéro de lot, le numéro de série, la date de péremption, la date d'expiration, le poids net, le GTIN peut servir à identifier d'autres instances individuelles d'un article du commerce.

Il est compatible avec ISO/IEC 15459 - Partie 4 : Produits et Emballages individuels du produit.

GTIN	Indicator	Company Pref	Article	Check Digit	Serial Number
	0	4012345	00734	3	2

Figure 2.2. Composition de GTIN [29]

2.5.2 Identifiants GS1 pour le transport et la logistique

2.5.2.1 Identifiants GS1 de localisation

GLN (Global Location Number ou numéro international pour la localisation, en français) est utilisé pour indiquer les emplacements physiques : adresses géographiques d'une organisation telle que Ship From ou Ship To. Le GLN est encodé soit dans un code à barres ou dans un tag EPC/RFID pour identifier automatiquement des endroits comme lieux de stockage dans un entrepôt, la destination d'une palette, ou l'origine d'un produit. De façon étendue, GLN peut également intégrer des informations sur les emplacements physiques internes tels que les bacs de stockage, portes de quai. C'est un outil de gestion du transport, expédition et réception, et de la gestion d'inventaire. GLN est reconnu en ISO Standard 6523 [30][29].

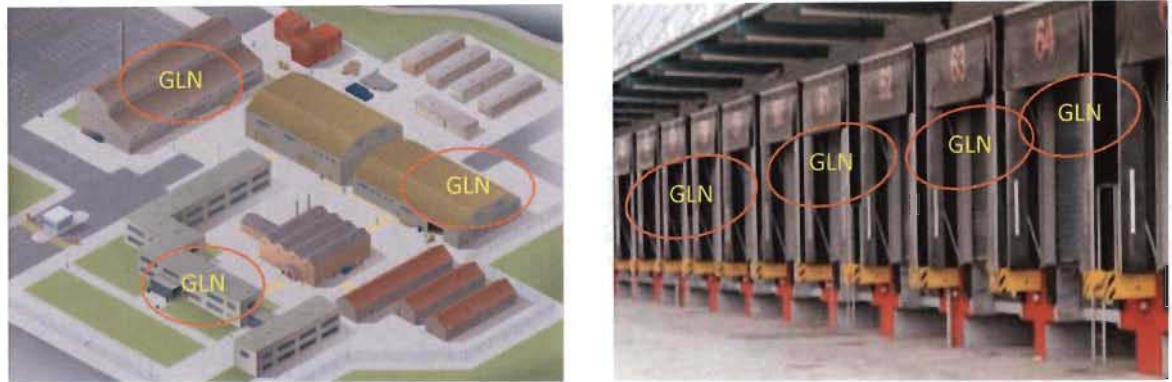


Figure 2.3. Exemple d'utilisation de GLN

Note : Pour les emplacements généraux, qui ne sont pas nécessairement liés à une entreprise en particulier, il ne convient pas d'attribuer un GLN. L'identification de ces emplacements généraux est basée sur d'autres standards non-GS1, tels que UN/LOCODE (voir <http://www.unece.org>).

2.5.2.2 Identifiants GS1 des unités logistiques

SSCC (Serial Shipping Container Code) identifie des unités logistiques telles que les charges unitaires sur des palettes ou des cages à rouleaux, et les colis. Le SSCC permet l'identification unique d'une combinaison d'éléments commerciaux emballés ensemble pour le stockage et/ou à des fins de transport [29].

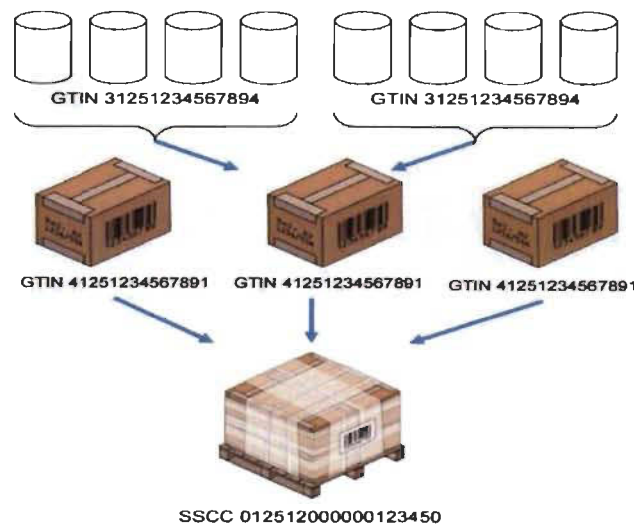


Figure 2.4. Exemple d'application de SSCC et GTIN

2.5.3 Identifiants GS1 pour les regroupements dans le transport

GSIN (Global Shipment Identification Number) permet d'identifier une livraison composée d'une ou plusieurs unités logistiques destinées à être livrées ensemble. Les unités logistiques appartenant à une expédition particulière conservent le même GSIN durant toutes les étapes du transport, du point de départ à la destination finale. Le GSIN peut être codé par l'expéditeur dans un code à barres ou sous forme de texte selon des règles internes, ou en plus du SSCC, sur une étiquette de la logistique [31].

Compatible avec ISO / IEC 15459 - Partie 8 : Groupement des unités de transport.

Note : Le GSIN pour *Global Shipment Identification Number* dont il est question ici peut souvent prêter à confusion avec le GSIN pour designer *Goods and Services Identification Number* du gouvernement canadien. Le dernier est disponible à l'adresse Buyandsell.gc.ca.

GINC (Global Identification Number for Consignment) est créé pour identifier des envois composés d'une ou plusieurs unités logistiques (appartenant potentiellement à différents envois) destinés à être transportés ensemble pour une partie de leur voyage. Les unités logistiques peuvent être associés à différents GINCs par les transporteurs ou transitaires pendant les phases de transport ultérieures [32]. Les figures suivantes illustrent l'utilisation des identifiants ci-haut définis.

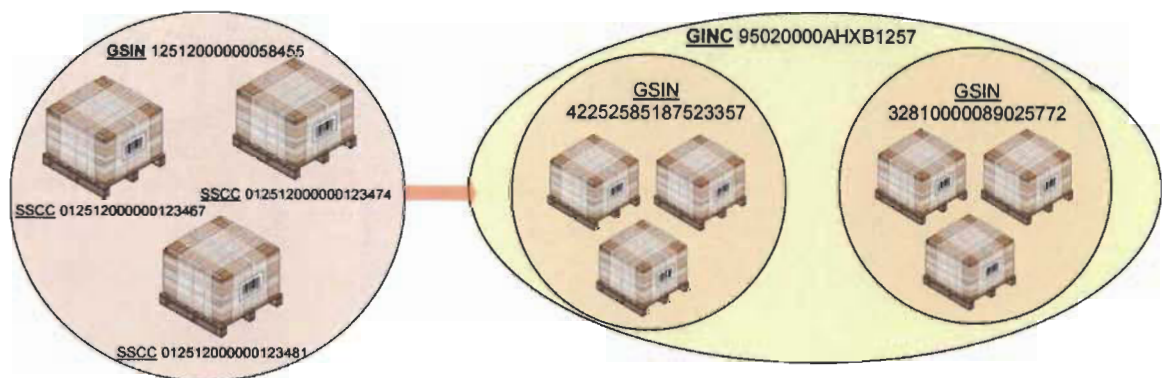


Figure 2.5. Relations entre SSCC, GSIN et GINC

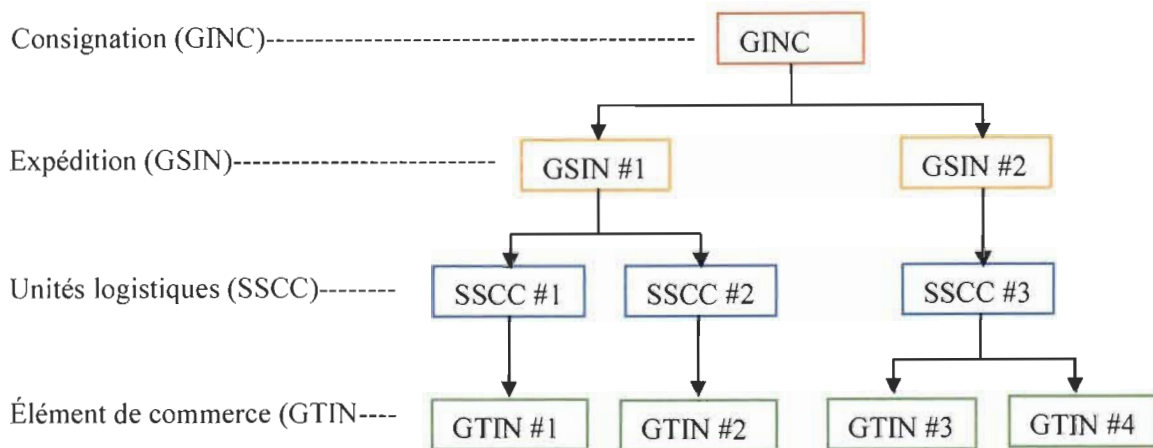


Figure 2.6. Exemple de groupement identifiants GS1

2.5.4 Identifiants GS1 des actifs à retourner

GRAI (Global Returnable Asset Identifier) est principalement utilisé pour identifier les articles de transport (RTI) tels que les palettes, conteneurs roulants, caisses ou tout autre type d'actif consigné, et également si nécessaire les cas individuels de l'actif remboursable via le numéro de série en option.



Figure 2.7. Exemple d'utilisation de GRAI [33]

GIAI (Global Individual Asset Identifier) identifier des actifs fixes comme le matériel de bureau, du matériel de transport, matériel informatique, véhicules. Le GIAI identifie des cas individuels d'actifs quel que soit le type d'actif.



Figure 2.8. Utilisation de GIAI dans les véhicules de transport [33]

2.5.5 Identifiant GS1 des relations de service

GSRN (Global Service Relation Number) sert à identifier les relations entre les fournisseurs de services d'une organisation et un fournisseur du service, tels que les médecins employés par un hôpital. Le GSRN peut être encodé dans un code à barres ou dans un tag EPC/RFID; par exemple, dans un badge ou un bracelet ou sur le point de mesure[33], [34].

De même, GSRN sert d'identifiant de relations entre les bénéficiaires de services d'une organisation offrant un service et un destinataire du service, tels que le compte de fidélité d'un client avec un détaillant, l'enregistrement d'un patient à l'hôpital, le compte d'un client avec une compagnie d'électricité.

De façon étendue, GSRN peut aussi servir d'identifier les rencontres de service, tels que les phases d'un traitement médical.

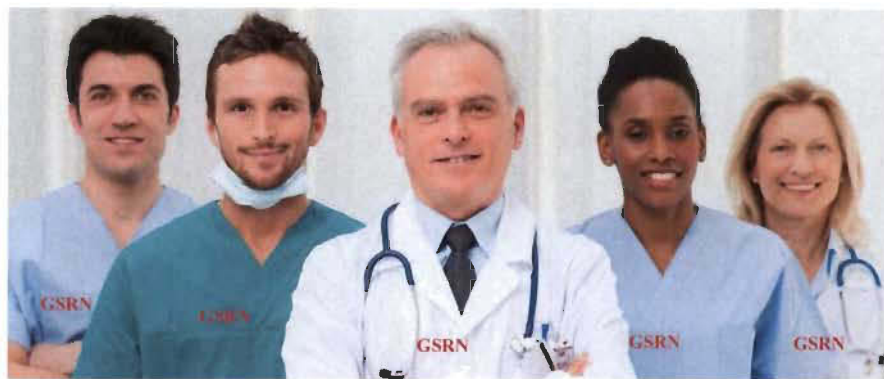


Figure 2.9. GSRN utilisé dans un cadre médical (source : <http://www.findyourabode.ca/>)

2.5.6 Identifiants GS1 du type des documents et coupons

GDTI (Global Document Type Identifier) identifie les documents physiques tels que les certificats, les factures, les permis de conduire, les documents électroniques tels que des images numériques, des messages EDI. Le GDTI identifie le type du document, et si nécessaire aussi les instances de document individuels via le numéro de série en option [35].

GCN (Global Coupon Number) est créé pour la gestion numérique des coupons (distribution, validation, le rachat, le règlement). Le GCN peut être présenté sous forme de code-barres pour permettre le traitement automatisé à point de vente (Point-Of-Sale). Le GCN peut également être présenté sous forme numérique. Au point de vente, l'offre de coupon est accessible via un compte de fidélité des consommateurs, ou être présentée sur un téléphone mobile comme un code-barres ou par communication en champ proche (NFC). Les GCNs peuvent également être utilisés pour traiter les coupons dans les boutiques en ligne [36].

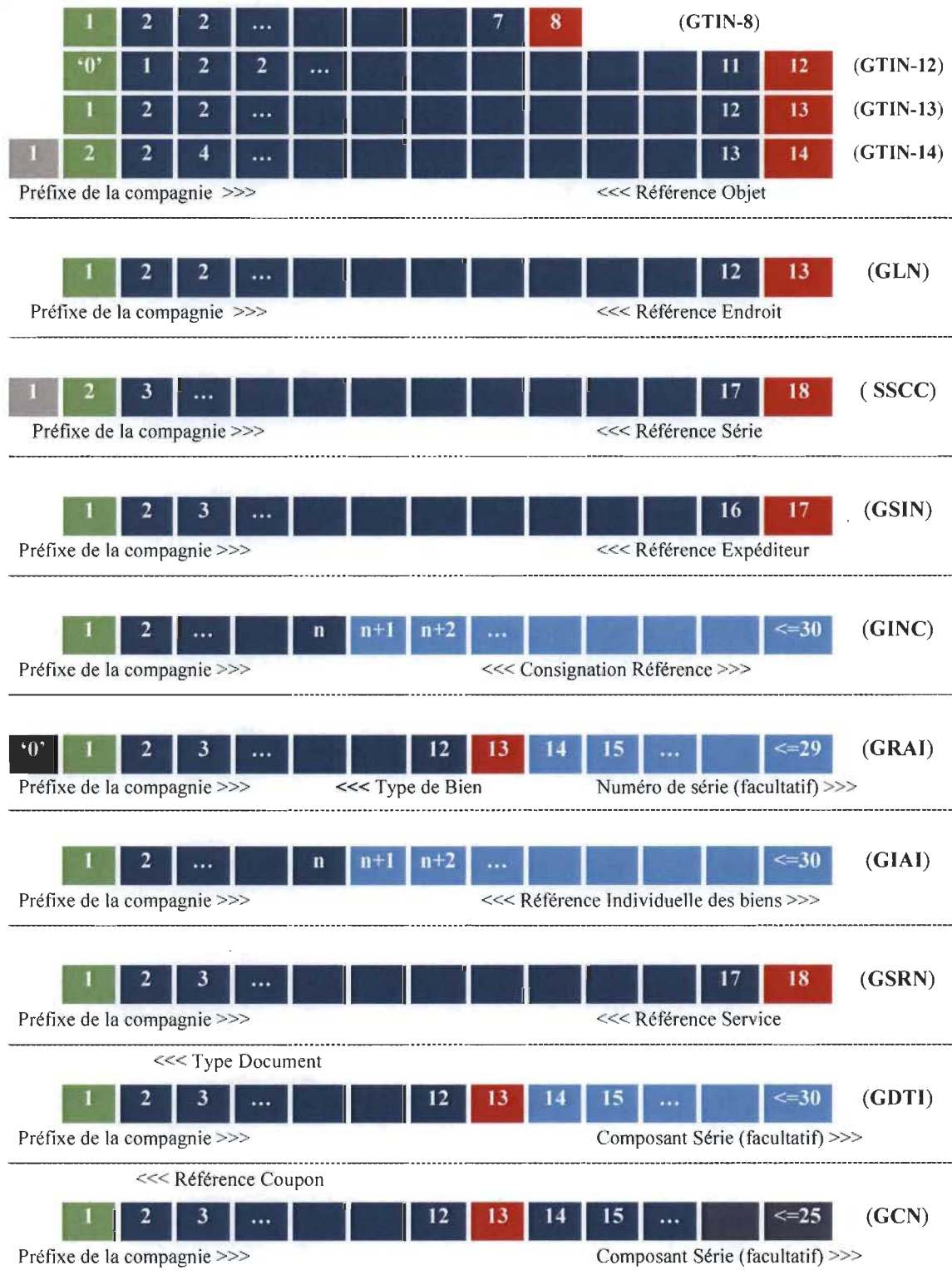
2.5.7 Identifiant GS1 des composants d'un ensemble

CPID (Component/Part Identifier) identifie les composants et pièces telles que moteur d'entraînement pour machine à laver, l'assemblage de ventilateur pour un moteur à réaction, le démarreur pour véhicule, axe de roue, ou tout autre composant ou de pièce individuelle, en combinaison avec le numéro de série. Le CPID peut être imprimé sous forme de texte ou d'encodage dans un code à barres ou dans un tag EPC/RFID attaché à la composante ou la partie [37]. Il est déconseillé d'utiliser l'identifiant CPID dans les chaînes d'approvisionnement ouvertes. Son utilisation est régie par un commun accord entre les différents intervenants dans la chaîne d'approvisionnement.



Figure 2.10. CPID utilise dans le domaine d'automobile [37]

Un récapitulatif des 11 identifiants est fait par la figure 2.11. Elle présente le type et la taille des informations portées par chacun des 11 identifiants.



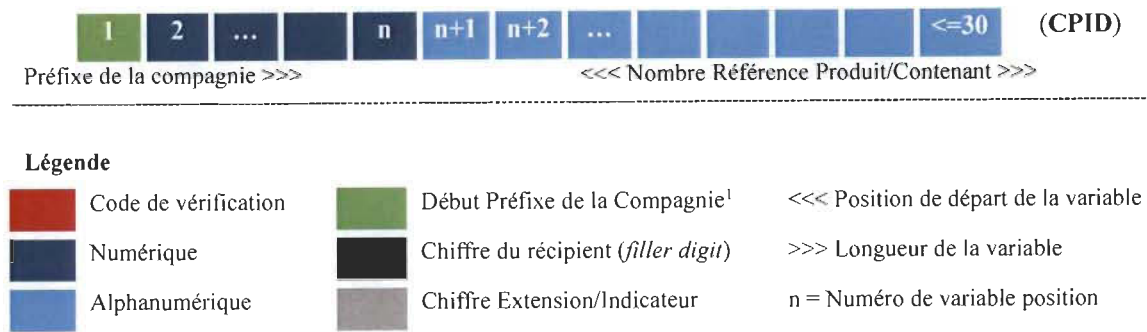


Figure 2.11. Les onze principaux identifiants de EPC Global

La légende (juste en bas de la figure 2.11) est nécessaire à la compréhension de l'ensemble.

2.6 CLASSES DU SYSTEME RFID

EPC Classes globales : En fonction de la fonctionnalité de tag, EPC Global, un organisme de normalisation (expliqué ci-haut) a classé les étiquettes RFID en six classes différentes. La différenciation est faite sur la base des critères liés à la capacité de lecture/écriture, source d'énergie, la capacité de mémoire, la capacité de communication du système RFID et la rétrocompatibilité. Ce dernier critère est fondamental pour une classe supérieure. A cet effet, chaque classe supérieure doit maintenir les capacités et les caractéristiques de la classe précédente et ajouter de nouvelles fonctionnalités. La classification est la suivante :

EPC Classe 0 ou Generation 1 ou encore Gen 1. Il s'agit des étiquettes passives connues sous le nom WORM (*Write Once Read Many*). Ces étiquettes comportent des puces IC écrites à l'usine pendant la fabrication et sont plusieurs fois lisibles par l'utilisateur.

EPC Classe 1. Les étiquettes de cette catégorie sont de la génération 1 et génération 2. Elles sont des étiquettes passives avec des puces WORM, mais cette écriture peut se faire soit à l'usine ou sur le site d'opération pour la première fois. Elles peuvent être lues par les lecteurs d'autres sociétés neutres sur la seule base des spécifications techniques de conception.

Les tags EPC Class 1 Generation 2 (EPC C1Gen2) sont WMRM (*Write Many Read Many*) ont un minimum de mémoire de 256 bits dont 96 bits pour le numéro EPC. Les tags EPC Classe 1 Gen 2 ont des spécificités aidant le lecteur à éliminer les doublons lors du balayage

¹ Avant de pouvoir commencer à utiliser les 11 identifiants GS1 définis ci-dessus, chaque entreprise doit avoir un préfixe GS1. Ce code unique au monde permet à l'entreprise de pouvoir utiliser les normes d'identification GS1. Le code est délivré aux représentations locales GS1.

de plusieurs tags. Ils fournissent un taux de lecture d'environ 10 fois plus rapide que les tags Gen 1 et sont 2-3 fois plus petits que ces derniers. Théoriquement, un tag EPC C1Gen2 peut retenir ses données pendant 40-50 ans, pour un maximum de 100 000 cycles d'écriture. Actuellement, l'EPC C1Gen 2 représente la plus importante étape dans la normalisation, de la performance et de la qualité des système RFID. Les fréquences et caractéristiques sont fournies ci-dessous.

- Fréquence d'opération des tags Gen 2 : Ils sont lus à une fréquence entre 860 MHz et 960 MHz. EPC Gen 2 860 MHz ~ 868 MHz est appelé Gen 2 - Europe et Gen 2 902 MHz ~ 928 MHz est connu sous le nom Gen 2 - Amérique du Nord. EPCglobal (ou EPC World Tag) est un tag idéal pour des solutions internationales pour sa limitation de la déviation de lecture à un écart maximum de 1,5 dBi sur tout le spectre de lecture de 860 ~ 960 MHz.
- Caractéristiques de mémoire : Tous les tags Gen 2 présentent des fonctionnalités de mémoire similaires.
 - 96 bits de numéro EPC de pris en charge, utilisé pour de nombreuses autres fins comme des capacités d'écriture/lecture.
 - 32-64 bits identifiant tag (TID) - identifie le fabricant du tag et a également des capacités d'écriture/lecture.
 - 32 bit permet de tuer le mot de passe pour désactiver définitivement le tag.
 - 32 bit d'accès au mot de passe pour verrouiller les caractéristiques d'écriture et de lecture du tag et, éventuellement, servir à la désactivation du tag.
 - Mémoire utilisateur - dépendant du fabricant et peut être aussi peu que 0 à 64 bits et atteindre 2048 bit ou plus.

EPC Classe 2. Les étiquettes passives, avec possibilité de lecture/écriture en fonction de la mémoire disponible pour l'utilisateur, et possibilité de cryptage des données. Les étiquettes EPC Class 2 sont des versions améliorées des étiquettes Gen 2 Class 1. Ils contiennent toutes les caractéristiques de classe 1 plus un identifiant du fabricant du tag appelé ID Tag (TID). La définition des spécifications n'est pas encore terminée pour EPC Classe 2.

EPC Classe 3. Regroupe les étiquettes semi-passives avec des capteurs environnementaux à bord, possibilité de lecture/écriture, et la disponibilité d'espace mémoire pour l'utilisateur.

Les tags EPC Class 3 ne sont pas encore complètement définis. Ils peuvent communiquer passivement, ce qui signifie qu'ils auront besoin d'un lecteur/interrogateur pour initier des communications et envoyer des informations au lecteur en utilisant soit la rétrodiffusion ou en utilisant d'autres techniques.

EPC Classe 4. Les étiquettes actives avec des capteurs embarqués, capacité de lecture/écriture, mémoire utilisateur, et la fourniture pour la communication par pairs avec d'autres étiquettes similaires actives et avec l'interrogateur. Ils ne vont pas interférer avec les protocoles de communication de la classe 1, 2 ou 3. La classe 4 est à son début de définition des caractéristiques.

EPC Classe 5. Cette classe définit le lecteur/interrogateur, qui peut communiquer et alimenter les étiquettes appartenant à des classes précitées.

2.7 THEORIES ET PRATIQUES DU SYSTEME RFID

Pour des raisons simplistes et pédagogiques, l'analyse du système RFID avalise dans ses littératures un grand nombre des considérations purement hypothétiques. Dans ce qui suit, nous en faisons ressortir les plus importantes.

2.7.1 Système RFID idéal

L'intérêt de formulation d'un tel système est de nous aider à une meilleure compréhension des problèmes rencontrés par les systèmes RFID réels. Il y a lieu de souligner que cette analyse ne concerne que les systèmes RFID UHF passifs. Étant donné que les étiquettes passives n'ont pas de batterie, elles ont besoin de recevoir suffisamment d'énergie pour activer le circuit des tags. Par conséquent, pour un système RFID passif donné, la balise doit recevoir assez de puissance pour se réveiller, et sa réponse rétrodiffusée doit être correctement reçue et décodée par le lecteur. En plus de cette fonction de base, un système RFID a plusieurs autres exigences pour un fonctionnement efficace qui seront décrites plus loin que les caractéristiques souhaitées. Ressorties de la fonctionnalité de base des théories sur le système RFID, un système RFID idéal se caractérise comme suit :

- a. Il existe, une zone de lecture contrôlable bien définie pour chaque lecteur. Pour chaque balise dans sa zone de lecture, chaque lecteur a un taux de lecture (ou

précision de lecture) de 100% et pour les étiquettes en dehors de sa zone de lecture, chaque lecteur a un taux de lecture de 0%.

- b. L'orientation physique des tags est sans influence sur la performance.
- c. La performance est insensible à l'environnement dans lequel le système est déployé.
- d. La performance est exempte de la nature de l'objet sur lequel l'étiquette est placée.
- e. Les tags communiquent avec le lecteur d'une manière sans risque de collision et la durée de lecture d'un nombre donné de tags est une fonction déterministe du nombre de tags en utilisant la bande passante maximale admissible.
- f. La performance est exempte des possibles effets de la présence de plusieurs lecteurs (ou plusieurs tags) dont les zones de lecture se chevauchent.
- g. Le mouvement relatif entre les lecteurs et les étiquettes, aussi longtemps que limité dans la zone de lecture du lecteur, est sans effet sur la performance.

2.7.2 Système RFID en pratique

A l'opposée des considérations ci-dessus, nous avons un aperçu sur la réelle complexité d'un système RFID.

La figure 2.12 présente les possibles scénarios rencontrés dans l'utilisation des systèmes RFID. (a) le système comprend un unique tag T lu par un seul lecteur R, (b) un seul lecteur pour multiples tags, (c) plusieurs lecteurs, y compris au moins un interférant R_i , et dont un seul lecteur (R_d) communique avec l'un unique tag T, (d) lecteur mobile et plusieurs tags (e) le système complexe comprenant nombreux lecteurs et tags où les lecteurs sont connectés au routeur et à l'ordinateur.

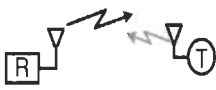

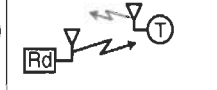


Systèmes RFID stationnaires			Systèmes RFID Mobiles/ stationnaires	
(a)	(b)	(c)	(d)	(e)
 <ul style="list-style-type: none"> • ZI mal définie. • Sensible à : <ul style="list-style-type: none"> - l'orientation physique des tags; - la nature de l'objet portant le tag; - l'environnement. 	 <ul style="list-style-type: none"> • Effet de collisions entre les tags. • Sensible à la proximité avec d'autres tags. 	 <ul style="list-style-type: none"> • Interférence lecteur à lecteur. • Interférence lecteur-tag. • Phénomène de lecture indésirée. 	 <ul style="list-style-type: none"> • Tags manqués • Augmentation du niveau d'interférence 	 <p>Problèmes de complexité de :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Intégration logicielle ; • La mise en réseau • Déploiement • Synchronisation

Figure 2.12. Différents scénarios de systèmes RFID en pratique

2.7.2.1 Problèmes de définition de la zone interrogation ZI

La ZI est un élément capital dans le processus d'identification. Dans l'espace libre, lorsqu'un tag se déplace loin d'un lecteur, la valeur moyenne de la puissance qu'il reçoit diminue selon l'équation de liaison sans fil décrite par Friis. De ce fait, le taux de lecture (voire précision de lecture) diminue jusqu'à ce que le tag atteigne un endroit où il est incapable de recevoir une puissance suffisante et le taux de lecture tombe ainsi à zéro. Il y a eu plusieurs études mettant ce phénomène en évidence.

En pratique, il est difficile de déterminer analytiquement l'intensité du champ magnétique en tenant compte de la propagation par multiples trajets dans un environnement physique. Une meilleure approche de ce problème est non seulement l'utilisation de modèles statistiques qui sont déjà utilisés avec succès pour décrire les effets de propagation du champ et des canaux de propagation radio (voir Rappaport & McGillem, 1989), mais aussi l'utilisation de

méthodes de tracé de rayons (voir Bosselmann & Rembold 2006a ; 2006b Bosselmann & Rembold) pour simuler la distribution de champ dans des applications passives RFID UHF.

$$P_r = P_t G_t G_r \left(\frac{\lambda}{4\pi r} \right)^2 \quad (2-2)$$

Où P_t est la puissance transmise, G_t est le gain de l'antenne d'interrogation, G_r est le gain de l'antenne de l'étiquette, λ représente la longueur d'onde de la porteuse et r est la distance au point cible.

2.7.2.2 Orientation physique des tags

Il a été démontré dans plusieurs expériences différentes, dont celle présentée dans [9], qu'une orientation relative du tag et/ou du lecteur affecte de manière significative les performances d'un système RFID. Certains tags ne peuvent être lus que dans une position verticale ou horizontale, certains ne sont pas lisibles sur le bord, et puis quelques tags peuvent être lus indépendamment de l'orientation. La figure 2.13 suivante montre l'effet d'orientation de tag sur les performances de lecture même lorsque le tag est maintenu dans la plage de lecture de l'antenne du lecteur. Les expériences ont été réalisées dans une chambre anéchoïque. Selon les auteurs, durant l'expérience, le lecteur est fixé à la position $(x, y, z) = (0, 0, 0)$ et le tag est déplacé à 0,5m dans la direction y . Trois mesures sont prises pour des orientations différentes du tag par rapport à l'orientation de l'antenne du lecteur.

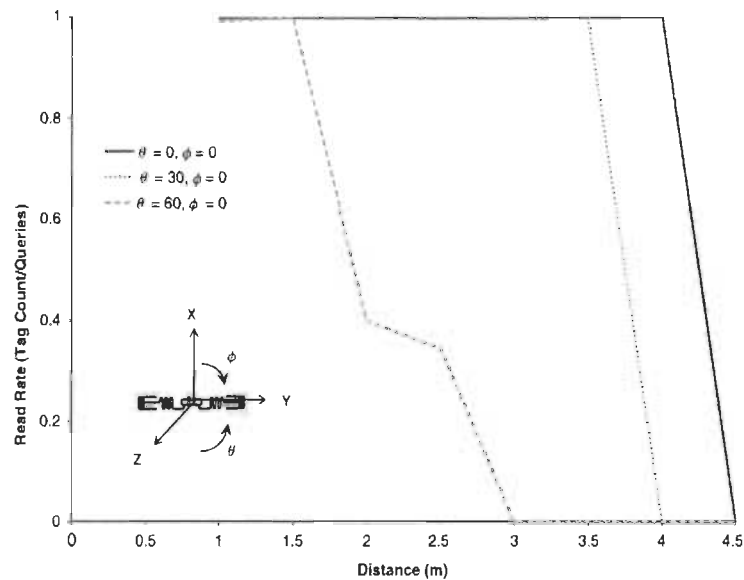


Figure 2.13. Effet d'orientation du tag sur le taux de lecture [9]

2.7.2.3 Sensibilité à l'environnement de déploiement

Tout comme n'importe quel système sans fil, la nature de l'environnement affecte les propriétés multi trajets et de dégradation du canal. Cet effet est encore plus prononcé dans les systèmes RFID passifs en raison de la nature du fonctionnement des tags et le signal de rétrodiffusion intrinsèquement faible par rapport au bruit (SNR). Les nature, dimensions et formes géométriques de l'environnement peuvent toutes affecter les signaux selon les fréquences d'opération.

2.7.2.4 Sensibilité à la nature de l'objet sur lequel le tag est placé

Il est connu que les systèmes UHF RFID ne fonctionnent pas bien lorsqu'ils sont attachés à des objets qui contiennent des métaux et des fluides. Ces matériaux non seulement atténuent le signal lorsqu'il est placé entre l'étiquette et le lecteur, mais entraînent également une dégradation de la performance de l'antenne du tag. Ce dysfonctionnement peut également se produire avec dans la proximité de ces matériaux. L'effet du métal et de l'eau sur la plage de lecture et la précision de lecture a fait l'objet de plusieurs études scientifiques, dont [9]. La plage de lecture d'un système RFID déployé dans un milieu métallique et/ou contenant de l'eau peut être réduite jusqu'au tiers de sa valeur normale dans l'espace libre.

2.7.2.5 Collision entre tags

Dans le système pratique, à la différence du système idéal, les collisions peuvent se produire entre les tags qui tentent de communiquer avec le lecteur dans le même tour de requête. Dans le contexte de Gen2, une collision se produit lorsque deux étiquettes sélectionnent le même numéro d'emplacement à rétrodiffusion. Dans ce cas, le lecteur est souvent incapable de déchiffrer la transmission au tag et la tentative de communication échoue [1], [9], [38]. La collision provoque une surcharge significative du temps nécessaire pour lire une population de tags. Cette non-idéalité est encore aggravée dans les scénarios impliquant un grand nombre d'étiquettes simultanément dans le champ de vision du lecteur, ce qui est le cas dans de nombreuses applications commerciales de la technologie RFID. Cependant, ces collisions sont le résultat du protocole sélectionné, notamment en standard Gen 2 qui est basé sur le paradigme Aloha. La norme ne spécifie pas la mise en œuvre de l'algorithme d'anticollision, mais donne seulement des recommandations. Le temps d'interroger une population de tags peut être minimisée si le nombre de tags dans la population est connue ou si elle est correctement estimée [9].

2.7.2.6 Effet de la proximité des tags les uns des autres

Dans un système RFID idéal, les tags voisins n'auront aucun effet sur la performance des autres [9], [19]. Cependant, ceci n'est pas le cas en réalité. Dans les applications les plus pratiques, les tags RFID sont placés sur des objets qui sont fortement co-localisés. Il est donc très important de comprendre l'effet que les tags ont les uns sur des autres.

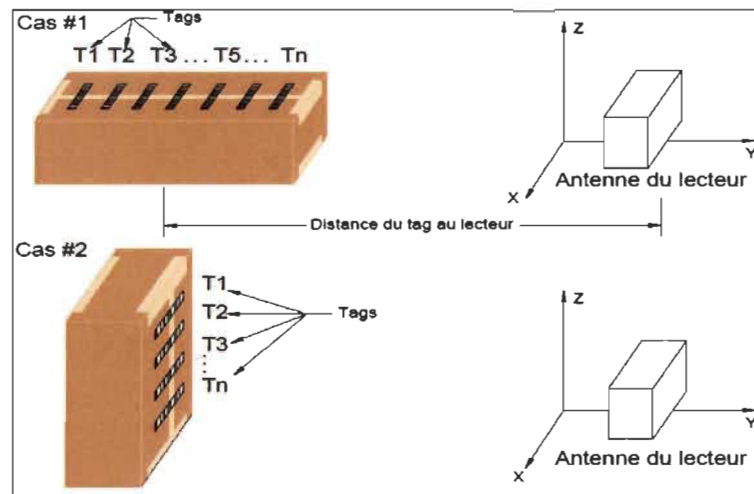


Figure 2.14. Effet de la proximité des tags les uns des autres

2.7.2.7 Multiples lecteurs, unique et multiples Tag(s)

Dans les références [1], [9], [18], [39], les auteurs mettent en évidence la complexité liée aux situations dans lesquelles il y a plusieurs lecteurs fixes et un ou plusieurs tags fixes. La présence de plusieurs lecteurs introduit la diversité et la redondance qui aident à résoudre certains des problèmes précédemment mentionnés. La redondance de lecteurs a pour objectif de diminuer la probabilité que l'étiquette se situe dans un angle mort pour tous les lecteurs. Cette technique est couramment utilisée dans l'industrie pour améliorer la précision de lecture. La localisation des tags peut également être améliorée par l'utilisation de plusieurs lecteurs [10], [39].

Cependant, la présence de plusieurs lecteurs dans un environnement donne lieu à d'autres problèmes plus/moins graves, tels que des interférences provoquées par leur fonctionnement simultané. Les effets de ces problèmes sur la performance du système RFID sont examinés ci-dessous.

2.7.2.8 Interférence

Un système avec deux lecteurs et un tag est illustré à la figure 2.12 (c). Dans cette figure, la communication entre le lecteur désiré R_d et le tag est affectée par le signal envoyé par le lecteur interférant R_i . Lorsque plusieurs lecteurs tentent d'entrer simultanément en communication avec les tags, deux types d'interférences peuvent se produire : interférence lecteur-lecteur et interférence lecteur-tag. L'interférence lecteur à lecteur ou brouillage du lecteur se produit lorsque le lecteur brouilleur (interfèrent, R_i) affecte la réception par le lecteur désiré du signal provenant du tag. L'interférence lecteur-tag ou brouillage du tag peut se produire lorsque le lecteur interférant affecte la réception par le tag du signal provenant du lecteur désiré.

2.7.2.9 Lecteurs mobiles et/ou tags mobiles

La mobilité est nécessaire dans certaines applications RFID. Le lecteur et/ou le tag peuvent être mobiles. La figure 2.12 (d) montre un exemple dans lequel le lecteur est portable et les tags sont stationnaires. Comme souligné dans [9], les antennes des tags RFID conçues pour des applications stationnaires fonctionnent de façon fiable lorsque des tags se déplacent à faible vitesse. Notamment, la vitesse de déplacement d'environ 16 km/h est jugée suffisamment basse pour un fonctionnement fiable. Cela correspond, par exemple, à la situation dans laquelle le lecteur est attaché à un chariot élévateur à fourche et les tags sont placés sur les éléments qui se trouvent sur les étagères. Dans les systèmes mobiles, la probabilité pour que le tag se situe dans un angle mort est presque nulle. En raison de la mobilité des étiquettes et/ou lecteurs, le lecteur sera finalement capable de lire l'étiquette. Bien que la mobilité puisse aider dans le traitement de certains des problèmes identifiés, il introduit également de nouveaux problèmes dans le système. Les algorithmes centralisés pour réduire les interférences peuvent échouer si les lecteurs sont mobiles et certains tags pourraient ne pas être lus car ils apparaissent devant le lecteur pour la durée relativement très limitée.

2.7.3 Paramètres de fonctionnement du système RFID

Les principaux paramètres qui affectent la portée et le débit de données sont interdépendants comme le montre le graphe de dépendance sur la figure 2.15. Dans cette figure, les paramètres et les choix de décision que les concepteurs/utilisateurs du système RFID ont le contrôle sont présentés dans les hexagones. Ces paramètres comprennent la fréquence de fonctionnement,

la puissance d'émission, la bande passante, le codage numérique de modulation et le taux d'erreur binaire acceptable (TEB, ou BER en anglais). Les paramètres opérationnels clés qui sont affectés par ces paramètres de conception comprennent la distance de fonctionnement (portée de lecture) et le débit du système (proportionnel au débit de données). Ces paramètres opérationnels sont présentés dans les rectangles. Les objets de forme ovale de la figure 2.15 sont des éléments intermédiaires qui sont influencés par un ou plusieurs paramètres de conception. Ils comprennent le rapport signal sur bruit (SNR), niveau de bruit, la sensibilité du récepteur, et la figure de bruit (NF). Le niveau du bruit à l'entrée d'un récepteur, par exemple, est fortement dépendant de la bande passante du récepteur. La figure de bruit est une mesure de la dégradation du rapport signal sur bruit provoqué par les composants de la chaîne du signal RF. NF dépend du type de la technologie des semi-conducteurs, et détermine dans quelle mesure le bruit à l'entrée du récepteur est amplifié par rapport au signal avant d'arriver au niveau du démodulateur. Certains paramètres et dépendances possibles sont omis dans la figure 2.15 pour des raisons de simplification [1], [9]. La combinaison de ces principaux paramètres et leurs valeurs déterminent finalement le type de tag. Bien qu'il existe un grand nombre de possibles inter-permutations entre ces paramètres, le type de tag peut être classé par le type de liaison de communication (champ proche ou champ lointain), la méthode de transmission du tag (émission ou réflexion), et le type d'alimentation (batterie ou à la récolte de l'énergie).

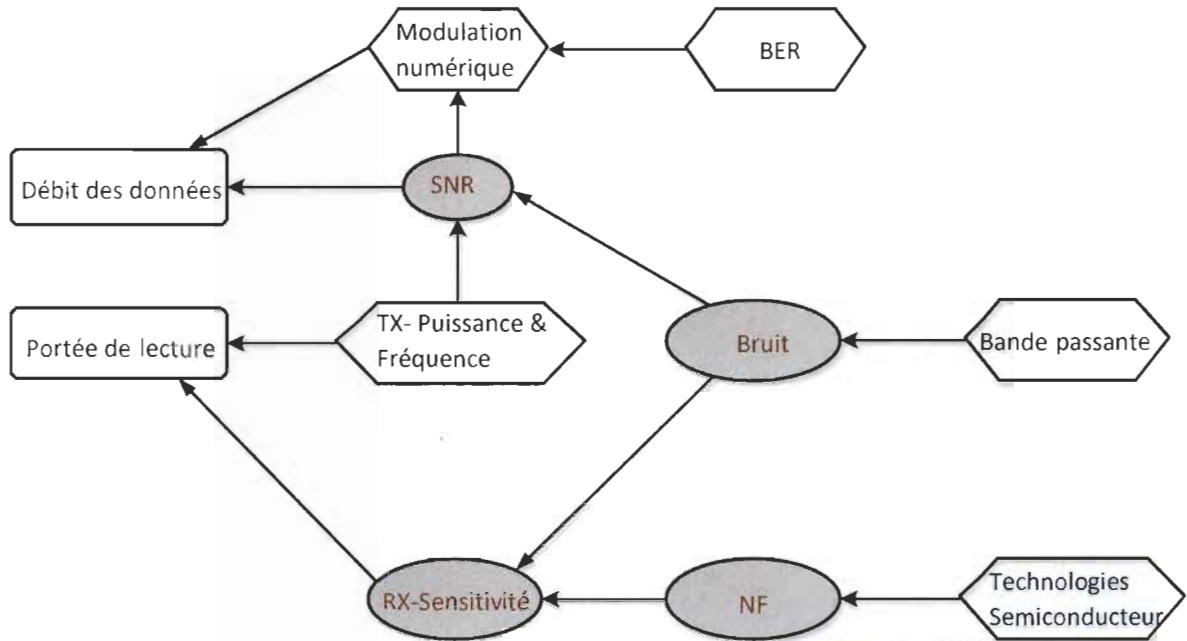


Figure 2.15. Diagramme d'indépendance des paramètres du système RFID

L'impact d'ajustement d'un de ces paramètres opérationnels clés d'un système RFID est jugé adéquat pour représenter le comportement général des différents types du systèmes RFID.

Le champ lointain commence là où l'impédance d'onde se stabilise rapidement vers la valeur d'impédance en espace libre de 377 Ohms [40]. Pour les petites antennes, électriquement cette distance est

$$R_{NF}[m] = \frac{\lambda}{2\pi} \quad (2-3)$$

Cette distance R_{NF} est essentiellement le rayon de la région de champ proche autour d'une antenne, et est inférieure à 30,5 cm pour les systèmes UHF RFID commerciaux populaires qui opèrent dans la bande 915 MHz.

Dans la transmission numérique, le nombre d'erreurs de bits est le nombre de bits reçus d'un flux de données sur un canal de communication qui ont été altérées en raison du bruit, des interférences, une distorsion ou des erreurs de synchronisation de bits. Le taux d'erreur binaire (BER) est le nombre d'erreurs binaires par unité de temps. Comme son nom l'indique, le BER est défini comme étant le taux auquel les erreurs se produisent dans un système de transmission. Ceci peut être traduit directement par le nombre d'erreurs qui se produisent sur

une série d'un nombre déterminé de bits. La définition du taux d'erreur binaire peut être traduite en un simple ratio :

$$BER = \frac{\text{Nombre de bits erronés}}{\text{Nombre total de bits envoyés}} \quad (2-4)$$

Les rapports signal à bruit et le nombre E_b/N_o sont des paramètres qui sont plus associés à des liaisons radio et des systèmes de communication radio. Pour cette raison, le taux d'erreur binaire, BER, peut également être défini en termes de probabilité d'erreur ou POE. Pour le déterminer, trois autres variables sont utilisées. Elles sont la fonction d'erreur, erf, l'énergie contenue dans un bit, E_b , et la densité de puissance spectrale du bruit (ce qui est la puissance de bruit dans une bande passante de 1 Hz), N_o .

$$POE = \frac{1}{2} (1 - \text{erf}) \sqrt{\frac{E_b}{N_o}} \quad (2-5)$$

Le BER définit par le rapport E_b/N_o , est affecté par un certain nombre de facteurs. En manipulant les variables qui peuvent être contrôlées, il est possible d'optimiser un système pour fournir les niveaux de performance requis. Ceci est normalement effectué dans les étapes de conception d'un système de transmission de données de sorte que les paramètres de performance peuvent être ajustés à la phase initiale du concept de design [41], [42].

- Interférences : le niveau d'interférence dans un système RFID est fixé par des facteurs externes et ne peuvent pas être modifiés par la conception du système. Cependant, il est possible de régler la bande passante du système en réduisant la largeur de bande, lequel acte a pour avantage de réduire la vulnérabilité du système aux interférences et l'inconvénient de limiter le débit de données pouvant être atteint.
- Augmentation de la puissance de l'émetteur : En augmentant le niveau du système d'alimentation, il est possible d'augmenter la puissance par bit. Ceci permet de réduire le BER, tout en impliquant d'autres inconvénients.
- Modulation d'ordre inférieur : les schémas de modulation d'ordre inférieur améliorent également le BER, mais cela se fait au détriment du débit de données.

Le SNR est le rapport signal-bruit. En communication analogique et numérique, ce rapport généralement mesuré en décibels (dB) exprime la force du signal par rapport au bruit de fond.

Mathématiquement, pour un signal S corrompu par un bruit N , tous les deux exprimés à la même unité (microvolts, par exemple), le SNR en décibels est donné par la formule :

$$SNR [dB] = 20 \log_{10} \left(\frac{S}{N} \right) \quad (2-6)$$

De prime abord, le rapport S/N peut être augmenté en augmentant S et/ou diminuant N . En pratique, les ingénieurs de communication cherchent toujours à maximiser le rapport S/N en utilisant la largeur de bande la plus étroite possible du récepteur compatible avec la vitesse de données souhaitée. Dans certains cas, les techniques d'étalement de spectre peuvent améliorer les performances du système. La minimisation de la température du circuit de réception permet de réduire/maintenir le niveau du bruit. Dans les systèmes sans fil, il est toujours important d'optimiser le rendement des antennes émettrices et réceptrices.

La figure de bruit (NF) est la représentation logarithmique du facteur de bruit, F , comme représentée dans l'équation (2-7).

$$NF [dB] = 20 \log_{10}(F) \quad (2-7)$$

Pour un dispositif à deux ports, le facteur de bruit est défini comme étant le rapport du SNR à l'entrée et le SNR à la sortie, comme indiqué dans l'équation (2-8).

$$F = \frac{SNR_{in}}{SNR_{out}} \quad (2-8)$$

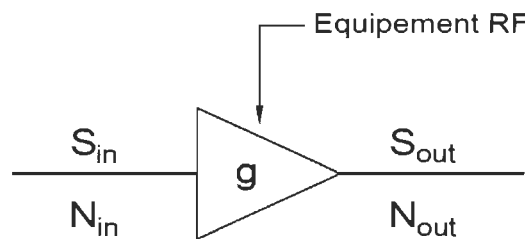


Figure 2.16. Termes utilisés pour décrire la figure de bruit

$$F = \frac{\frac{S_{in}}{N_{in}}}{\frac{S_{out}}{N_{out}}} = \frac{N_{out}}{N_{in}g} \quad (2-9)$$

Où S_{in} et S_{out} sont les puissances du signal d'entrée et le signal de sortie, respectivement. De même N_{in} et N_{out} sont respectivement les puissances du bruit à l'entrée et à la sortie. g est le rapport S_{out}/S_{in} . Le bruit d'entrée, N_{in} , est défini comme kTB . Où k la constante de Boltzmann, T la température en Kelvin du matériel et B la largeur de bande de mesure. Normalement, le facteur de bruit pour un appareil est fourni par le fabricant ou est un paramètre qui peut être mesuré.

CHAPITRE 3 SYSTÈMES A ONDE ACOUSTIQUE DE SURFACE

3.1 TAGS SAW

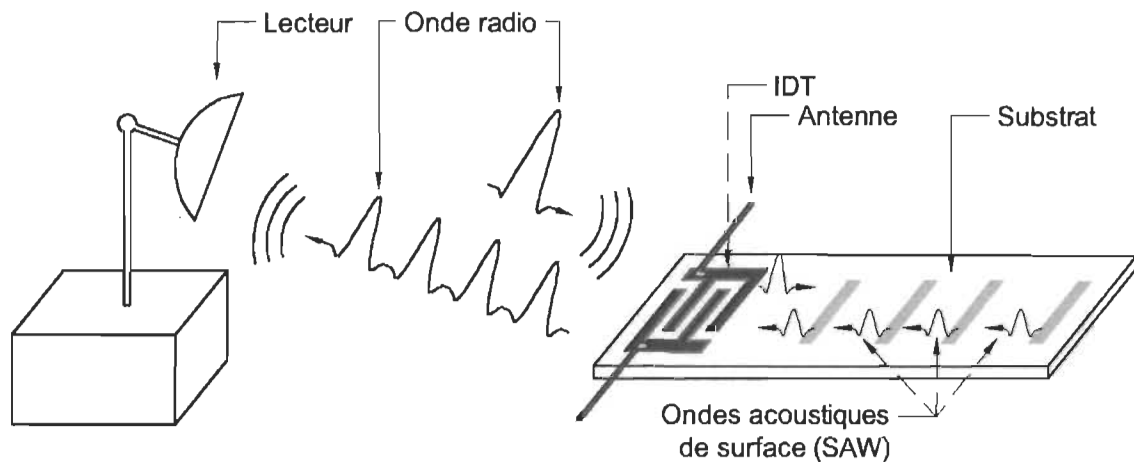


Figure 3.1. Principe de fonctionnement d'une étiquette RFID SAW

Les dispositifs à Ondes Acoustiques de Surface (SAW) peuvent être utilisés dans le processus d'identification et de détection des éléments (transpondeurs SAW) pour la mesure de grandeurs physiques telles que la température, la pression, le couple, l'accélération, l'humidité, etc., qui ne nécessitent pas d'alimentation et peuvent être accessibles sans fil [11]. La principale caractéristique des dispositifs SAW est que leur fonctionnement est basé sur des micro-acoustiques de cristaux piézo-électriques plutôt que sur des semi-conducteurs. Comme par écho radar, le transpondeur passif répond avec un signal RF qui peut être reçu par le terminal (front-end) local du système émetteur-récepteur. L'amplitude, la fréquence, la phase et le temps d'arrivée de ce signal RF de réponse comportent des informations sur les mécanismes de réflexion SAW et de propagation qui, dans de nombreux cas peuvent être directement attribuées à l'effet de capteur pour un certain mesurande [17], [43].

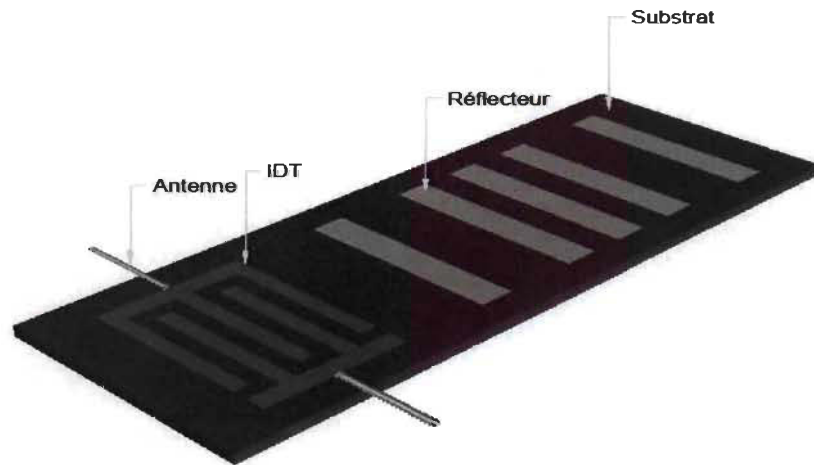


Figure 3.2. Différentes parties Tag SAW

Un réflecteur a une largeur d'environ $0,4\ \mu\text{m}$ à $0,6\ \mu\text{m}$, qui est sensiblement plus étroite que la fente qu'elle occupe. Pour le réflecteur, une largeur de fente (*slot*) de $25\ \text{ns}$ correspond à environ $50\ \mu\text{m}$ dans l'espace physique. En plus de la simplicité de leur structure, ces dispositifs sont totalement passifs : ils ne nécessitent pas d'alimentation en courant continu, car ils reflètent simplement le signal d'interrogation en tant que dispositifs linéaires. Par ailleurs, le signal d'interrogation peut être d'environ 100 fois plus faible (environ $2\ \text{mV}$ sur l'antenne de l'étiquette) que pour les dispositifs équivalents en circuits intégrés (IC) [43]. Ceci permet de fabriquer des tags SAW en utilisant la technologie photo lithographique à une seule couche de métal, bien que le fonctionnement dans la bande micro-onde nécessite de la lithographie submicronique (électrodes à l'échelle de $0,3\ \mu\text{m}$ environ), qui est actuellement un outil standard dans la fabrication des IC [1], [11], [13], [17], [43]. Cela permet la fabrication de dispositifs fonctionnant à $2,45\ \text{GHz}$ dans la bande de fréquences réservée à l'échelle mondiale aux applications ISM. Les matériaux piézoélectriques sont largement utilisés pour l'excitation et la détection d'ondes acoustiques. Grâce aux propriétés piézoélectriques des tags SAW, les ondes électromagnétiques sont converties en ondes acoustiques de surface d'environ 100 000 fois plus lentes [43]. De ce fait, les tags SAW peuvent fonctionner comme des lignes à délai et créer un retard suffisant entre les signaux

d'interrogation et de réponse (lecteur-tag et tag-lecteur) avec une longueur relativement faible de substrat.

3.1.1 Principe de fonctionnement

Dans certains cristaux diélectriques, l'application d'une contrainte mécanique produit une polarisation électrique et, à l'inverse, un tel cristal subit une distorsion mécanique lorsqu'un champ électrique est appliqué. Grâce à cette propriété, les dispositifs SAW fournissent une sortie mécanique à partir d'une entrée électrique, ou vice-versa. La transduction entre un signal électrique et une onde acoustique est obtenue en utilisant un transducteur interdigital (IDT), composé de 2 structures métalliques entrelacées déposées en peigne sur la surface d'un substrat piézoélectrique. Un lecteur émet une impulsion d'interrogation qui est reçue par l'antenne du tag, directement reliée à un IDT. L'IDT transforme le signal électrique en une onde acoustique de surface à l'échelle nanométrique, qui est une onde mécanique des déplacements de particules. Particulièrement à 2,45 GHz, le paramètre le plus important d'une étiquette d'identification SAW est la perte d'insertion. En conséquence, l'onde de Rayleigh classique des substrats est exploitée. L'impulsion à onde acoustique générée se propage ensuite le long de la surface du substrat, qui est habituellement constituée d'un matériau à forte piézoélectricité, comme le niobate de lithium (LiNbO_3 -YZ et LiNbO_3 - $\text{rot}(28^\circ)$) [24]. Cependant, même dans ces substrats, l'affaiblissement de propagation est de 6 dB/ μs à 2,45 GHz, à 433 MHz elle est négligeable à 0,25 dB/ μs , alors qu'elle est d'ordre de 1 dB/ μs à 900 MHz. L'impulsion de SAW est partiellement réfléchiée et partiellement transmise par chacun des code-réflécteurs, placé à des positions déterminées avec précision sur la puce. Ces réflecteurs se composent généralement d'une ou plusieurs bandes étroites d'aluminium. L'impulsion à onde acoustique réfléchiée revenant à l'IDT porte un code basé sur les positions des réflecteurs [17], [43]. Cette méthode de codage est basée sur la temporisation des impulsions réfléchiées. Elle est connue sous le nom le codage de position dans le temps (*Time Position Encoding, TPE*) ou modulation de position d'impulsion (*Pulse Position Modulation, PPM*). Lorsque le train d'impulsions SAW réfléchiées revient au IDT, le signal acoustique est ensuite reconverti en une forme électrique et retransmis par l'antenne du tag. Le signal de réponse est alors détecté et décodé par le lecteur. En pratique, les nouvelles tendances dans la conception des lecteurs de tags SAW sont plutôt orientées vers

des méthodes de lecture plus simples en domaine fréquentiel. Les $S_{11}(f)$ des tags sont mesurés, puis la transformée de Fourier est effectuée dans le domaine temporel.

3.1.2 Conception du tag SAW

Depuis les années 70, les premières étiquettes SAW ont été proposées. Les étiquettes d'identification SAW sont généralement constituées de deux parties : d'abord, un IDT, pour générer et recevoir des impulsions SAW, (ou plusieurs IDT si l'entrée et la sortie du tag sont séparées) et, d'autre part, un moyen pour modifier (encodage) le signal d'interrogation avant de le réémettre (les réflecteurs). Il existe deux façons d'arranger les réflecteurs. Soit tous les réflecteurs peuvent être positionnés sur différentes rangées appelées *tracks* (figure 3.3) ou plusieurs réflecteurs peuvent être alignés en une ou seulement quelques *tracks* (figure 3.2). Dans le premier cas, tous les réflecteurs peuvent avoir 100% de réflectivité et ainsi refléter totalement l'onde incidente [24]. Dans le second cas, la réflectivité doit être diminuée afin de la rendre homogène pour tous les éléments réfléchissants. Le problème des réflexions multiples doit également être pris en compte. Le nombre optimal de réflecteurs par *track* pour un tag de 2,45 GHz a été calculé [44]; il est théoriquement égal à huit réflecteurs.

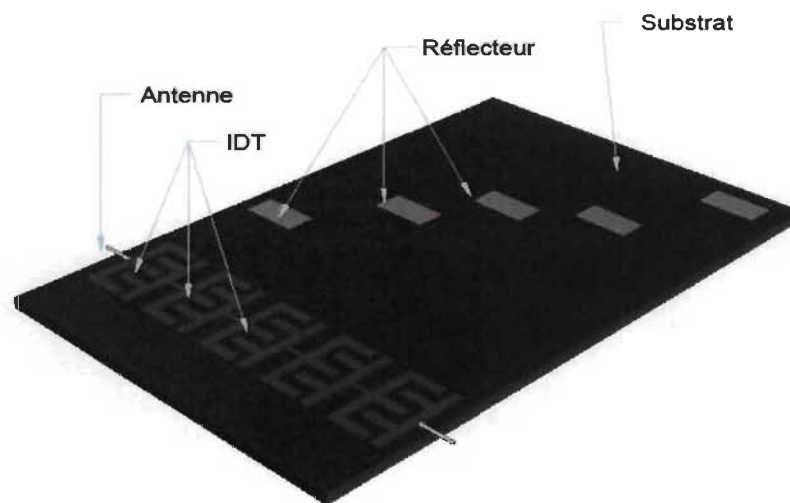


Figure 3.3. Tags à plusieurs rangées de réflecteurs

Les tags à une seule rangée IDT s'adaptent à des applications exigeant moins de codes. A ce problème s'ajoutent leur grande taille, des pertes élevées, des réflexions multiples et la

difficulté de codage. Dans le cas de tag avec plusieurs rangées IDT, les réflexions multiples sont partiellement réduites, mais les pertes sont plus élevées et la largeur du dispositif augmente [11], [14], [19], [43].

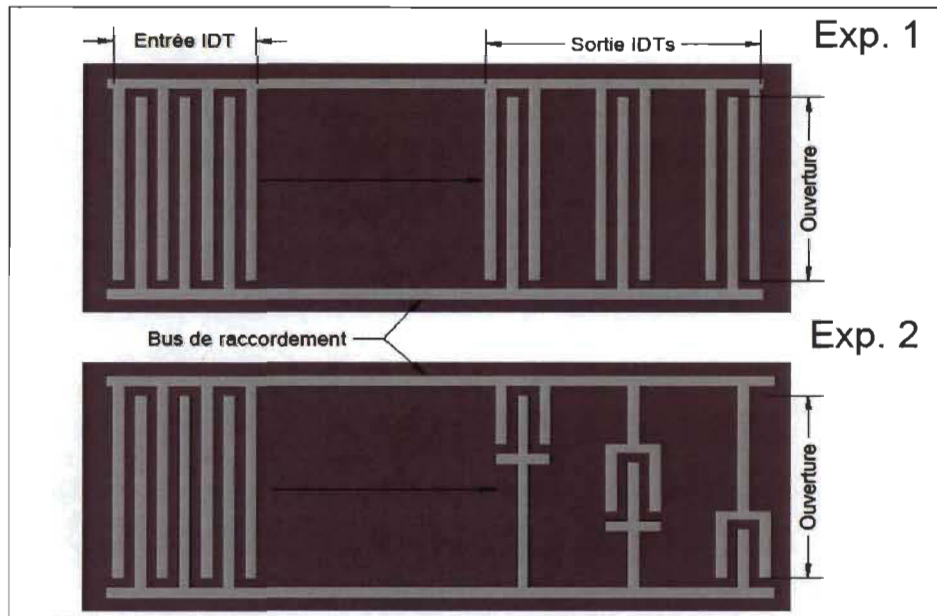


Figure 3.4. Les Exemple de configurations de transducteur de tags SAW

Comme décrit dans [43], les étiquettes à ondes acoustiques à base de transducteurs se composent généralement d'un grand nombre de transducteurs, les transducteurs d'entrée et plusieurs transducteurs de codage, appelés IDTs de sortie. Les IDT d'entrée et de sortie sont électriquement câblés en parallèle. Lorsqu'un signal électrique est appliqué au port électrique commun, les ondes acoustiques de surface seront générées par tous les transducteurs. L'atténuation d'un signal généré par l'IDT d'entrée et capté par une IDT de sortie sera le même que le signal généré par cette IDT de sortie et capté par l'IDT d'entrée.

Les électrodes des transducteurs peuvent être uniques ou doublées pour des atteindre les objectifs de codage (voir la figure 3.5.a et la figure 3.5.b).

Le codage de phase a été discuté depuis de nombreuses années. Théoriquement, l'idée de codage de phase est assez simple. En déplaçant légèrement les réflecteurs, les décalages de phase peuvent être réalisées et le codage de phase est ainsi mis en œuvre. En pratique, pour des raisons techniques et économiques, cette idée n'est pas encore appliquée dans les produits commerciaux [43].

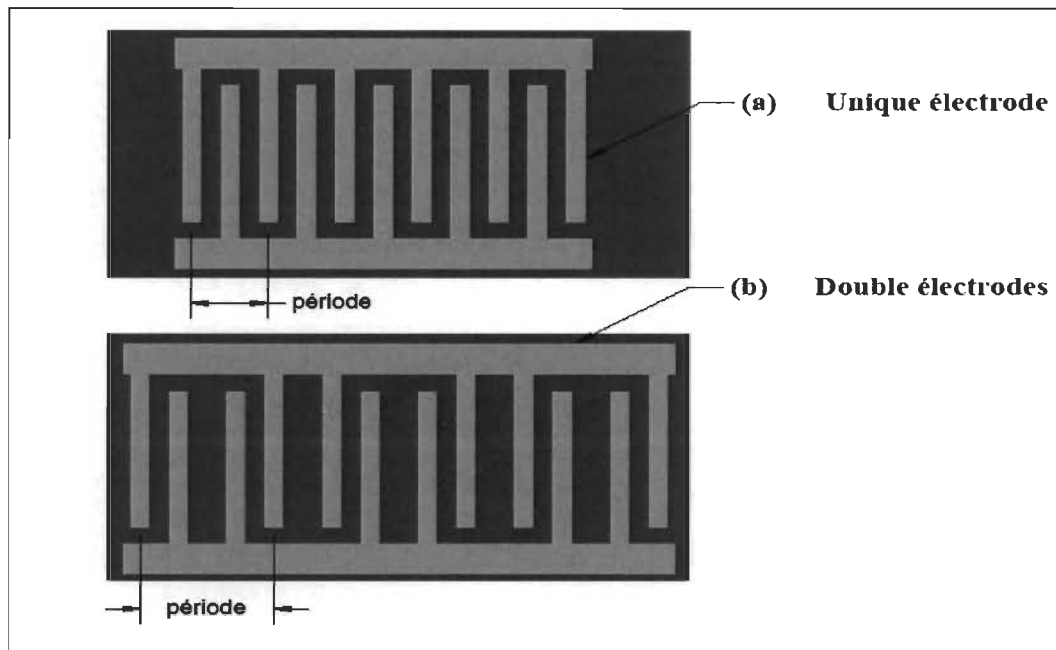


Figure 3.5. Les transducteurs interdigitaux, IDT, à une et deux électrodes

Le codage des premières étiquettes d'identification SAW (avec un IDT d'entrée et un réseau de IDT de sortie, comme représenté sur la figure 3.5 - a est basé sur la modulation d'amplitude, plus particulièrement, sur On/Off Keying (OOK). Les positions des transducteurs de sortie sont également espacées tout au long du substrat. La présence d'un IDT de sortie dans son emplacement désigné signifie une logique 1, tandis qu'une absence de sortie IDT représente une logique 0.

Une technique de mise en œuvre du codage binaire par modulation de phase est décrite dans la référence [20]. La modulation par déplacement de phase binaire (BPSK) est réalisée par deux pistes (*tracks*) connectées électriquement en parallèle. Chaque piste a un transducteur d'entrée et un ensemble de transducteurs de sortie. Les transducteurs de sortie sont placés à des retards égaux à partir des transducteurs d'entrée dans les deux pistes. Cependant, les polarités des électrodes sont en face dans les deux canaux. La BPSK, qui est un déphasage de soit 0° ou 180° , a été obtenue par déconnection d'un transducteur de sortie dans chaque piste à chaque position de bit.

3.1.3 Tags SAW RFID versus Tags Passifs IC

Les tags basés sur les technologies des circuits intégrés (IC) ont l'avantage en termes de mémoire et de la portée de lecture. En comparaison aux tags passifs IC, les tags SAW présentent plusieurs avantages énumérés dans [17].

- Les tags SAW fonctionnent avec de faibles impulsions RF d'environ 10 mW où un équivalent tag IC nécessiterait un rayonnement continu de quelques watts, à la même distance.
- Les étiquettes SAW fonctionnent dans la bande ISM de 2,45 GHz - conforme à la réglementation des émissions RF à travers le monde. L'utilisation d'étiquettes IC exige une certification spécifique.
- Les étiquettes SAW résistent mieux dans un environnement métallique ou liquide ; ils ont une grande capacité de pénétration dans les palettes contenant du métal ou des articles liquides.
- Les étiquettes SAW sont très robustes dans des environnements hostiles pour des raisons de température élevée, de choc mécanique, etc., où leurs concurrentes à base de semi-conducteurs sont plus sensibles.
- Le processus de lecture des étiquettes SAW permet une mesure directe et précise de leur température, ce qui leur confère une capacité d'incorporer facilement les fonctions de capteurs.
- Par rapport aux lecteurs des tags passifs IC, les lecteurs de tags SAW résistent plus aux interférences de quelques watts à la même fréquence que Bluetooth, réseau local sans fil, etc.
- Pour atteindre une même distance de lecture que les lecteurs SAW, les lecteurs des tags passifs IC doivent émettre 100 à 1000 fois plus de puissance RF, jusqu'à quelques watts.

3.2 CAPTEURS SAW

3.2.1 Capteurs de température

Dans les littératures, notamment dans la référence [24], les capteurs de température à base d'onde acoustique de surface (SAW) fonctionnant aux fréquences de 433 MHz et 869 MHz sont analysés. Le principe de fonctionnement d'un tel capteur de température s'explique par

le fait qu'une modification Δv de la température ambiante se traduit par une variation ∂l et ∂v respectivement de la longueur du trajet et de la vitesse SAW. En conséquence, le temps de propagation τ varie de :

$$\frac{\Delta \tau}{\tau} = \left(\frac{1}{l} \frac{\partial l}{\partial \vartheta} - \frac{1}{v} \frac{\partial v}{\partial \vartheta} \right) \Delta \vartheta = \text{TCD}_1 \Delta \vartheta, \quad (3-1)$$

où TCD_1 représente le coefficient de température du retard (*Temperature Coefficient of Delay*) de premier ordre. Cette équation peut être généralisée à d'autres capteurs physiques (capteur de pression et capteur du couple moteur, par exemple) ou chimiques comme suit :

$$\frac{\Delta \tau}{\tau} = (S'_x - S''_x) \Delta x \quad (3-2)$$

où la sensibilité S de y à un changement z est définie par

$$S^y_z = \lim_{\Delta z \rightarrow 0} \frac{1}{y} \cdot \frac{\Delta y}{\Delta z} = \frac{1}{y} \cdot \frac{\partial y}{\partial z} \quad (3-3)$$

Le terme $\partial l/l$ représente la contrainte mécanique, qui peut aussi être causée par des facteurs tels que l'application directe d'une force mécanique ou électrostriction². Le second terme de l'équation (3-1) traduit un changement dans les paramètres du matériau. L'un ou l'autre effet peut être dominant, en fonction de la géométrie et du matériau du substrat. Lorsque YX- LiNbO_3 est soumis à un champ électrique de polarisation, par exemple, la contribution de la déformation mécanique est très supérieure à la vitesse, alors que sur YZ- LiNbO_3 avec un coefficient de température du retard de $85 \times 10^{-6}/\text{K}$, le coefficient de dilatation thermique est d'un ordre de grandeur plus faible que le coefficient de température de la vitesse [24].

3.2.2 Capteurs de pression

Bien que des capteurs de pression SAW monolithiques sont extrêmement stables et offrent une haute sensibilité à la pression, plusieurs applications ont besoin de modules de capteurs plus petits et moins chers qui peuvent être mis en œuvre avec des substrats de quartz standard. Un modèle courant de capteur de pression à base d'onde acoustique de surface est décrit par la figure 3.6. La SAW se propage sur un diaphragme de quartz tout en se pliant sous la

² Électrostriction (ou souvent magnétostriction) est une propriété de tous les non-conducteurs électriques ou diélectriques, qui leur permet de modifier leur forme sous l'application d'un champ électrique. (Source : <https://en.wikipedia.org>)

pression hydrostatique. Une pression de référence constante doit être appliquée à l'autre côté du diaphragme afin de le plier d'une manière définie. Ceci est réalisé en fabriquant une cavité hermétique contenant cette pression de référence : une unité de sablage est utilisée pour percer un trou borgne dans une plaque de couvercle en quartz du même matériau de substrat de la membrane. La membrane est ensuite fixée à la plaque de couverture avec un adhésif époxy [6],[10].

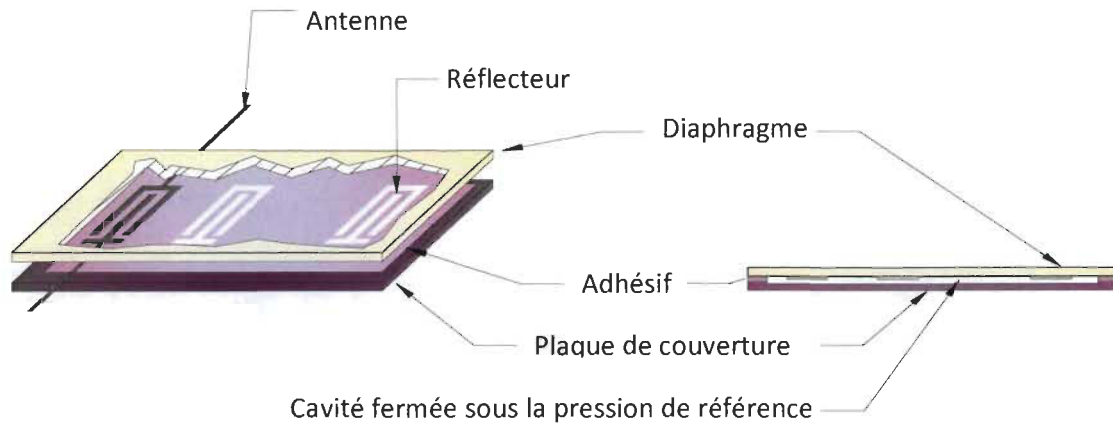


Figure 3.6. Dessin schématique d'un capteur de pression à ondes acoustiques

3.2.3 Capteurs de couple moteur

Par mesure indirecte, les tags SAW peuvent servir de capteurs de couple moteur. L'avantage d'utilisation de tels capteurs de couple moteur est que la mesure se fait sans contact direct avec le moteur. En plus, ils sont capables de fonctionner dans des environnements industriels soumis à de fortes perturbations électromagnétiques grâce à leurs fréquences de fonctionnement élevées comprises entre plusieurs centaines de MHz et environ 3 GHz et de la nature à large bande inhérente des capteurs SAW. Comme les jauges de contrainte résistive, les capteurs à ondes acoustiques mesurent le couple indirectement en détectant la distribution de contrainte ou contrainte générée par un couple agissant sur l'arbre. Le fait que les composantes de contrainte ont des signes opposés dans les $\pm 45^\circ$ directions par rapport à l'axe d'arbre (voir figure 3.7) peuvent être utilisées pour la compensation de température.

La référence [24] parle des mesures de couple dans un moteur à haute tension 750 kW, ainsi que dans un système d'identification pour des applications ferroviaires où aucun brouillage causé par le rayonnement parasite des onduleurs à haute puissance n'a pu être observé.

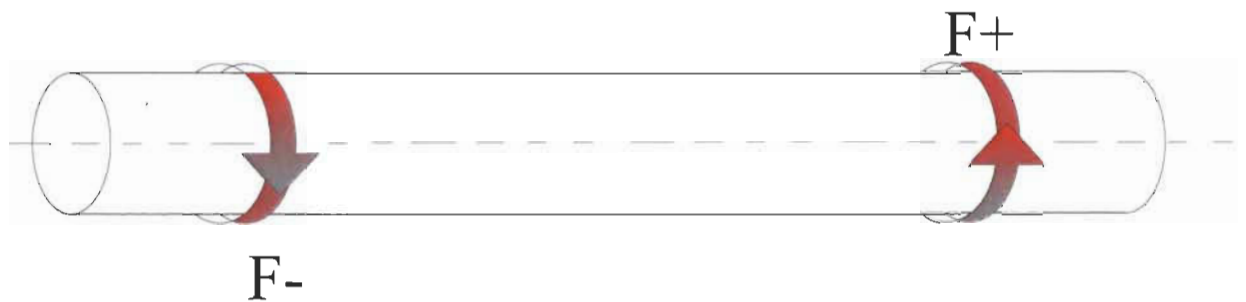


Figure 3.7. Déformation de surface provoquée par un couple agissant sur un arbre

3.3 LECTEUR DES DISPOSITIFS SAW

3.3.1 Exemple de lecteur conventionnel de tag SAW

A la lumière des différents techniques de conceptions et des applications des systèmes SAW, les besoins se font de plus en plus aigus en matière des outils de test et d'instrumentation. L'un des premiers meilleurs lecteurs SAW sur le marché est celui de <http://www.rfsaw.com/>. Le système RFID 501 RFSAW prend en charge le fonctionnement global à 2,45 GHz et offre une capacité de lecture longue portée à haute vitesse et une grande précision sur une large plage de températures. A l'image du lecteur RFID 501 RFSAW, les lecteurs SAW disponibles sur le marché sont propres à certaines applications dans une plage restreinte de fréquences. Pour pallier à ce problème, dans le présent travail, nous avons conçu un lecteur SAW flexible à base de la plateforme PXI Express de National Instruments®.



Figure 3.8. Modèle 501 du système de lecteur RFID SAW (Source : <http://www.rfsaw.com/>)

3.3.2 Lecteur SAW à base de la plateforme PXI Express

La plateforme PXI Express (PXIe) est de plus en plus utilisée dans les tests et instrumentations des systèmes RFID [45], [46]. Elle est beaucoup sollicitée en raison de sa grande flexibilité par rapport à ses concurrents. L'appellation PXI provient de *PCI eXtensions for Instrumentation*. L'architecture modulaire PXI offre un système robuste basé sur PC haute performance pour la mesure et l'automatisation.

Fondé en 1998, le consortium industriel *PXI Systems Alliance* (PXISA) promeut et maintient les normes et spécifications PXI afin d'assurer l'interopérabilité des produits des différents constructeurs PXI.

Dans le cadre du présent travail, nous avons développé un lecteur SAW à base de la plateforme PXI Express. Notre lecteur se compose d'un système émetteur - récepteur formé de huit modules NI PXI Express, dont trois du générateur de signaux vectoriels NI PXIe-5673, trois d'analyseur de signaux vectoriels NI PXIe-5663. A ceux-ci s'ajoutent un amplificateur double canaux et un module du contrôleur embarqué NI PXIe-8135. Le système est monté sur le châssis NI PXIe-1075. Le générateur de signaux vectoriels est constitué du générateur de signal RF NI PXIe-5652 (génération de la porteuse), d'un générateur de signaux arbitraires NI PXIe-5451 (génération de modulant) et d'un modulateur I/Q NI PXIe-5611. L'ensemble NI PXIe-5663 comprend un générateur de signal RF NI PXIe-5652 (suppression de la porteuse), un démodulateur NI PXIe-5601 et un convertisseur analogique-numérique NI PXIe-5622. L'appellation générique PXIe-567X est utilisée pour désigner les produits de la famille de PXIe-5673.

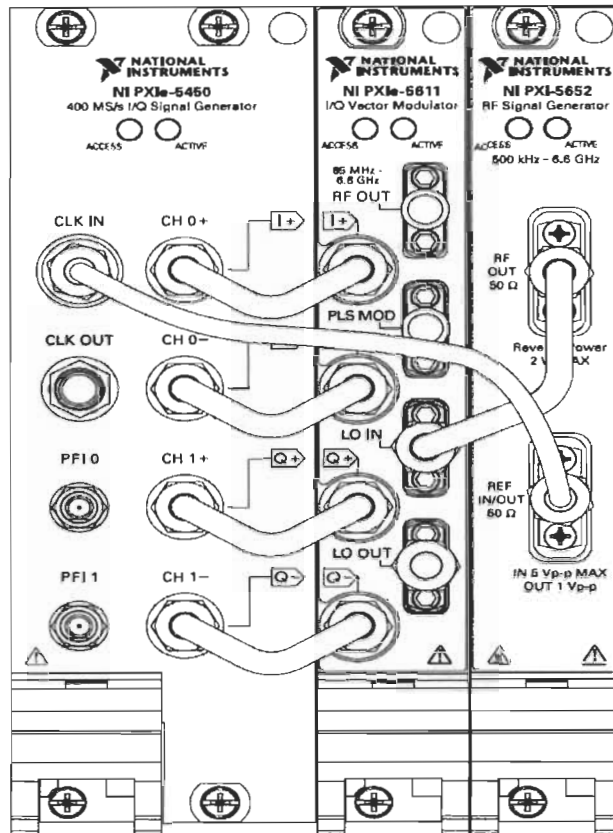


Figure 3.9. Générateur de signaux vectoriels – NI PXI-5673

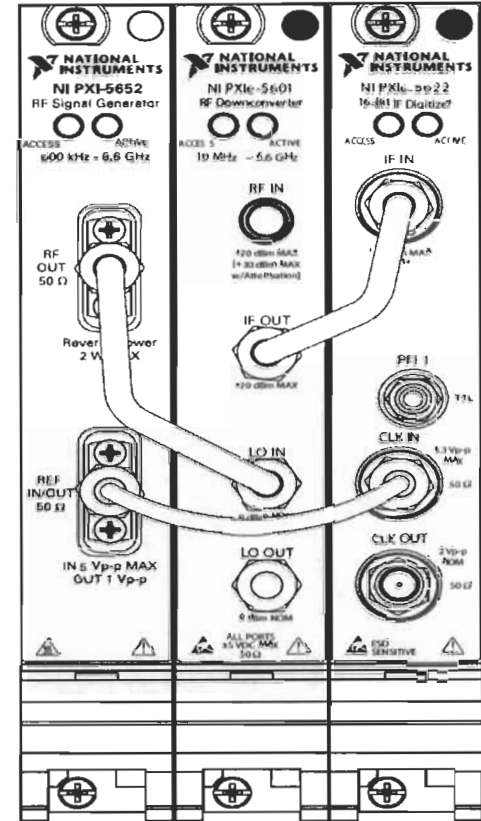


Figure 3.10. Analyseur du signal RF- NI PXI 5663

Un oscilloscope Tektronix® MDO4034B-3 est utilisé pour servir du matériel témoin et de validation des tests et mesures. Les caractéristiques des appareils sont disponibles ci-dessous :

1. Générateur de signaux vectoriels RFSG PXIe-5673

a. Générateur de signal RF PXIe-5652

- Plage de fréquence de 500 kHz à 6,6 GHz
- FM, 2-FSK, modulation OOK
- -110 dBc / bruit de phase de Hz à 1 GHz, 10 kHz décalage typique
- Résolution de fréquence inférieure à 1 ppb

b. Générateur de signaux arbitraires PXIe-5451

- Taux d'échantillonnage 400 MS/s, 16-bit

c. Modulateur vectoriel I/Q PXIe-5611 RF

- 85 Hz - 6,6 GHz
- Puissance de sortie jusqu'à 13 dBm

- < Précision de 0,1 dB

2. Analyseur de signaux vectoriels RFSA PXIe-5663

a. Démodulateur RF PXIe-5601

- Sensibilité < -100 dBm
- Gamme dynamique > 80 dB

b. Convertisseur analogique - numérique PXIe-5622

- Taux d'échantillonnage de 150 MS/s

3. Amplificateur RF NI PXI-5691, 8 GHz, programmable

- Jusqu'à +24 dBm puissance de sortie maximale
- Jusqu'à 60 dB gain total
- Résolution de gain de 0,5 dB
- Facteur de bruit typique < 5 dB

4. Contrôleur embarqué NI PXIe-8135

- Processeur quad-core Intel Core i7-3610QE 2,3 GHz, 4 Go de RAM
- Exécute LabVIEW™ 2012 SP1

5. Châssis PXI Express NI PXIe-1075, 18-Slot, 3U AC - Jusqu'à 4 Go/s

6. Tektronix© MDO4034B-3 Mixed Domain Oscilloscope

- 350 MHz -Time Domain
- Gamme de fréquences 9 kHz - 3 GHz
- Taux d'échantillonnage 2,5 Géch/s
- 4 canaux analogiques, 16 canaux numériques
- + Peak, -Peak, moyenne et détection de l'échantillon

3.3.2.1 Objectifs de personnalisation

Notre objectif principal est de réaliser un émetteur-récepteur de signaux vectoriels multifonctionnel capable de générer/analyser non seulement un simple signal OOK, mais aussi et surtout un signal BPSK pulsé (signal étalé). La motivation derrière cet objectif tient au fait que les systèmes SAW fonctionnent avec des signaux pulsés, généralement une modulation OOK. L'étalement du spectre vise à renforcer l'intégrité des données dans un environnement hostile. Les frameworks d'applications standard fournis avec la plateforme PXI Express permettent de générer individuellement plusieurs types de modulations

standard, y compris OOK et BPSK. Mais lorsqu'il s'agit de combiner deux modulations différentes (OOK+BPSK), il n'existe pas encore de frameworks adapté à ce besoin. A ceci s'ajoute la question d'adaptation d'interface aux besoins spécifiques : les frameworks sont fournis avec une interface générique, laquelle ne s'adapte pas généralement aux tests/mesures où la grandeur « temps » est une entrée.

3.3.2.2 Programmation du générateur de signaux vectoriels PXIe-5673

Les matériels de la plateforme PXI Express de National Instruments© sont contrôlés par des programmes LabVIEW™. Cette plate-forme de radio logicielle (*SDR, software defined radio*) associée à la puissance de la suite *LabVIEW™ Communications System Design* offre une interface graphique par flux de données qui facilite la conception de systèmes de communication beaucoup plus personnalisés. La plateforme offre également des frameworks d'applications standard prêts à l'emploi. L'architecture simplifiée des modules PXIe-5673 est donnée par la figure 3.11.

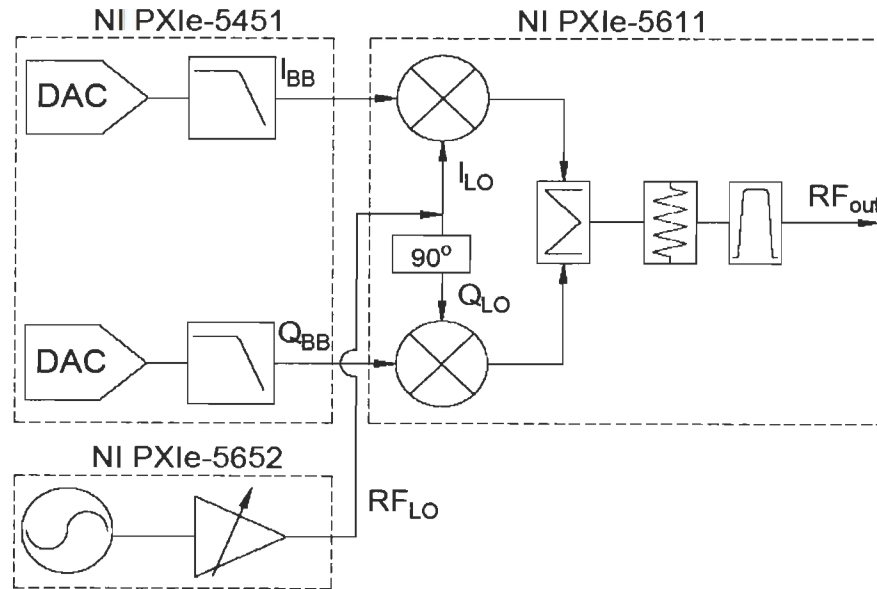


Figure 3.11. Schéma de principe du générateur de signaux vectoriels PXIe-5673

Avec :

$$\begin{cases} I_{BB} = G_{BB_I} I \\ Q_{BB} = G_{BB_Q} Q \end{cases} \quad (3-4)$$

$$\begin{cases} I_{LO} = G_{LO_I} \sin(\omega_{LO}t) \\ Q_{LO} = G_{LO_Q} \cos(\omega_{LO}t) \end{cases} \quad (3-5)$$

$$RF_{out} = G_{RF} \{ G_{BB_I} I G_{LO_I} \sin(\omega_{LO}t) + G_{BB_Q} Q G_{LO_Q} \cos(\omega_{LO}t) \} \quad (3-6)$$

Où G_{BB_I} , G_{BB_Q} , G_{LO_I} , G_{LO_Q} et G_{RF} sont les gains des entrées I, Q, I_{LO} , Q_{LO} et le gain du signal RF de sortie, respectivement, et I et Q sont les composantes en phase et en quadrature du signal en bande de base. ω_{LO} est la fréquence de l'oscillateur local, LO.

Si $G_{BB_I} = G_{BB_Q} = G_{BB}$ et $G_{LO_I} = G_{LO_Q} = G_{LO}$, l'équation (3-6) devient :

$$RF_{out} = G_{RF} G_{BB} G_{LO} \{ I \sin(\omega_{LO}t) + Q \cos(\omega_{LO}t) \} \quad (3-7)$$

Sur la base de ce principe, nous avons configuré les trois cartes en mode *External* (voir sur le diagramme LabVIEW™, partie encadrée en vert). L'idée consiste à générer de façon semi-indépendante les deux signaux (porteuse et modulant) et d'utiliser le NI PXIe-5611 pour la modulation. Les résultats escomptés sont des signaux en orange sur les graphes des figures 3.12 et 3.13.

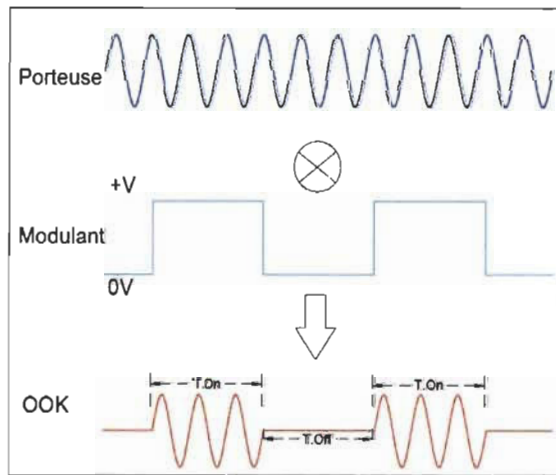


Figure 3.12. Principe des modulations mises en jeu

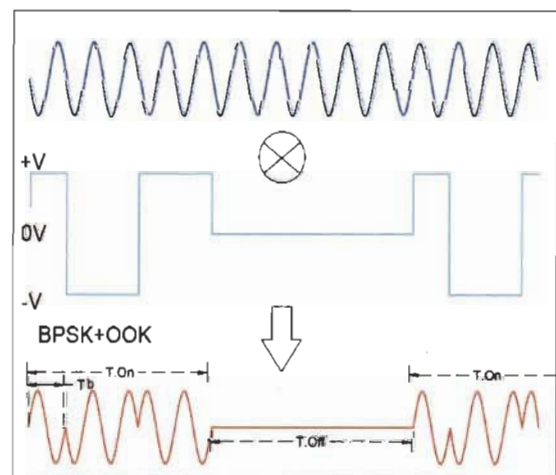


Figure 3.13. Principe de la modulation BPSK pulsé

Le diagramme LabVIEW™ développé à cette fin est donné par la figure 3.17. Sur le châssis PXIe-1075, les trois modules PXIe-5451, PXIe-5611 et PXIe-5652 occupent respectivement les emplacements slot 7, slot 9 et slot 10 (voir sur le diagramme LabVIEW™). Dans un Framework standard de diagramme LabVIEW™ pour la génération d'un signal OOK,

BPSK, QPSK, etc., un seul slot (9 ou 10, par exemple) aurait pu suffire, en ce sens qu'il existe déjà des pilotes du constructeur adaptés à ce type de besoin. Le générateur de signal arbitraire PXIe-5451 (slot 7) est fixé en mode Arbitrary Waveform pendant que ses données d'entrée (séquence) sont en virgule flottante. Sur le diagramme, le sous VI permettant de basculer entre les modes de génération de signal (OOK ou BPSK pulsé) est encerclé en rouge. Nous avons préféré générer le signal BPSK pulsé de deux manières selon le type de séquence désigné par l'utilisateur. Ce dernier a le choix entre une séquence régulièrement alternée de 1 et -1 (figure 3.15) et une séquence arbitraire générée selon la loi de Galois d'ordre 31 (figure 3.16).

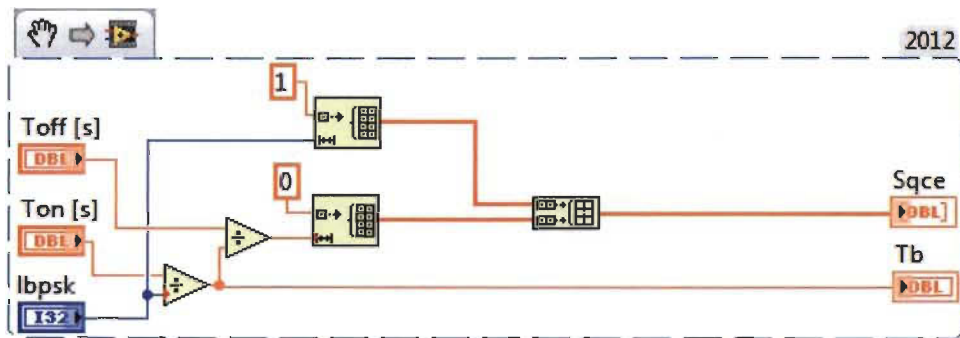


Figure 3.14. Construction de la séquence OOK

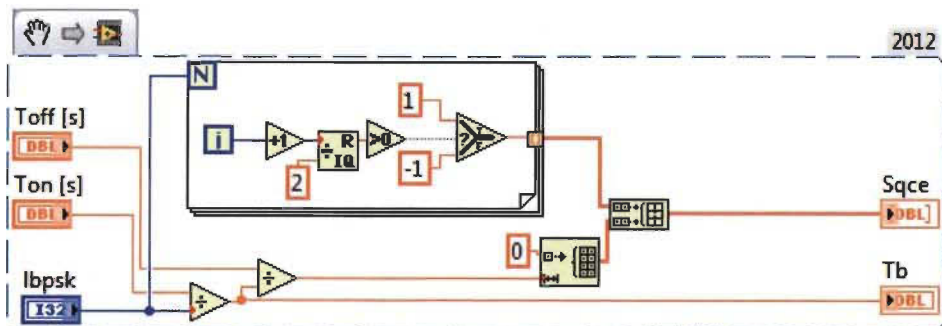


Figure 3.15. Construction de la séquence BPSK pulsé, de façon régulièrement alternée

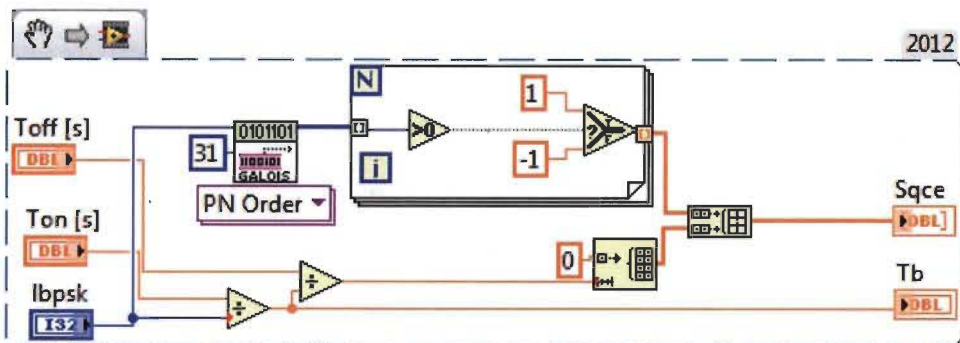


Figure 3.16. Construction de la séquence BPSK pulsé de façon arbitraire basée sur la loi de Galois

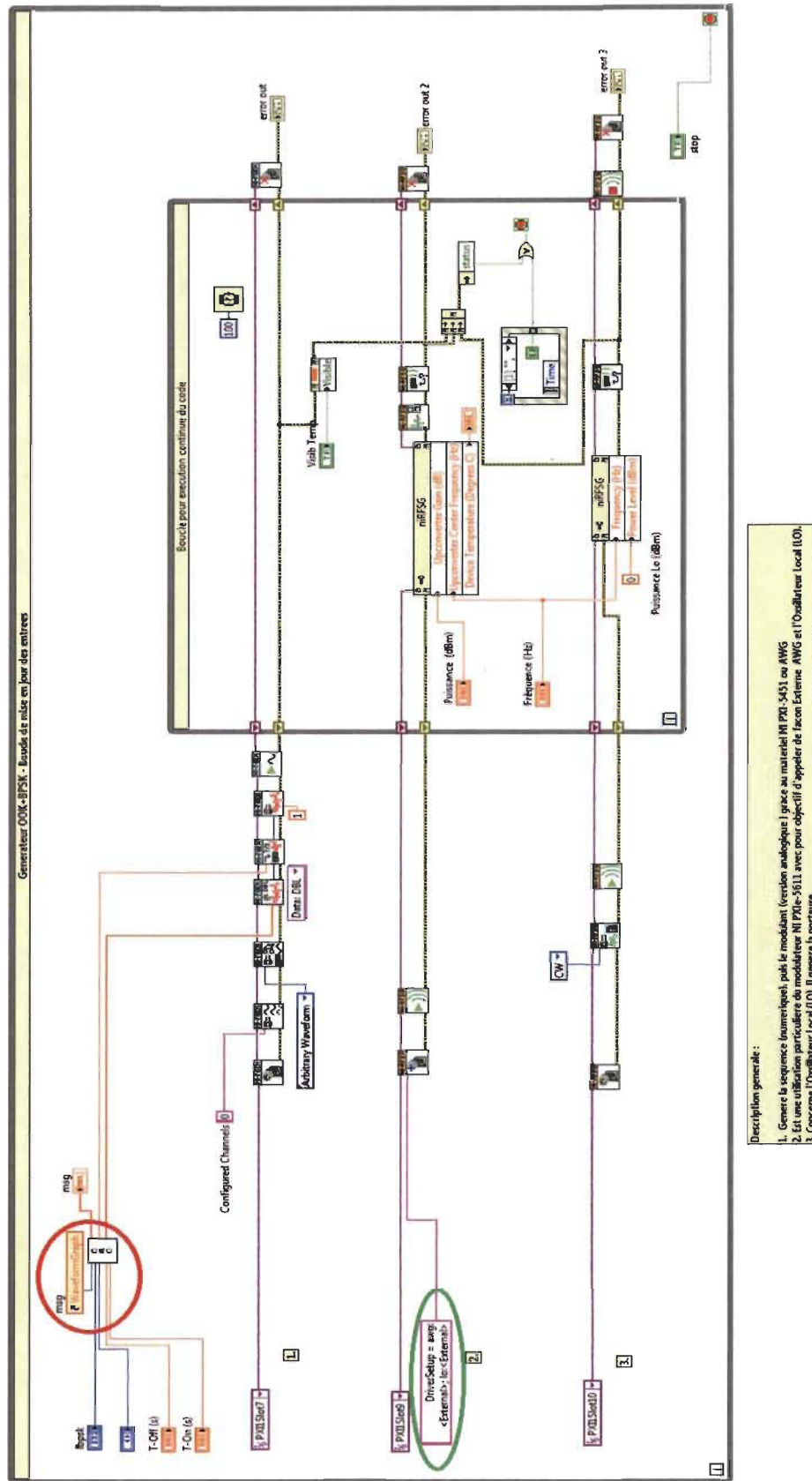


Figure 3.17. Diagramme LabVIEW du générateurPXIe-5673

L'interface du diagramme LabVIEW™ développée pour les tests et mesures est présentée par la figure suivante.

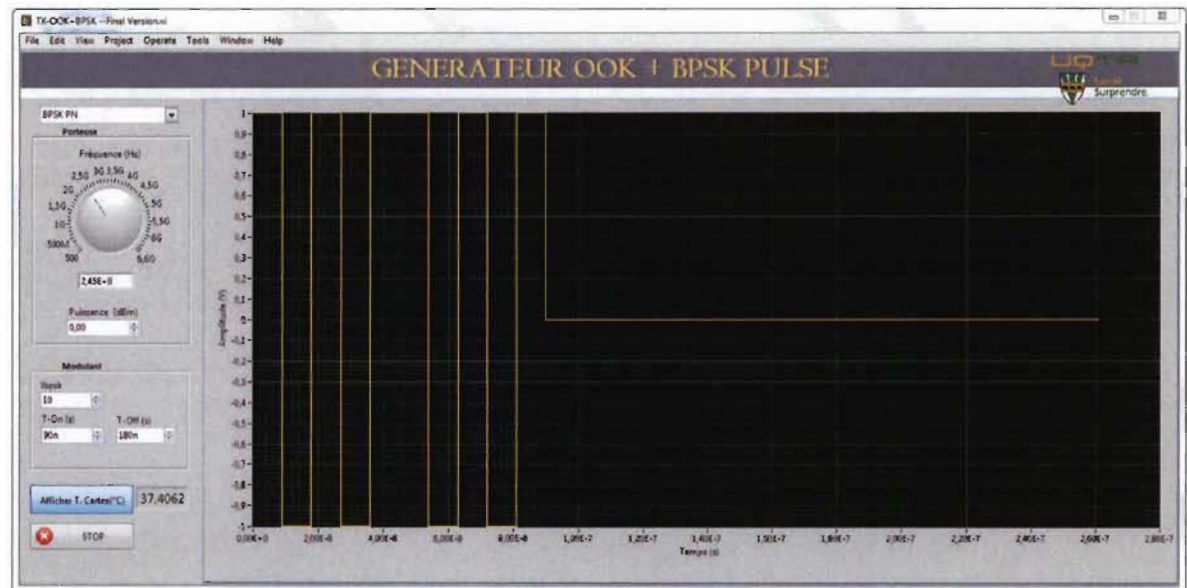


Figure 3.18. Interface développée pour le générateur PXIe-5673

3.3.2.2.1 Validation du générateur

Pour valider le générateur (émetteur), nous avons utilisé un analyseur de signal MDO4034B-3 pour mesurer les caractéristiques des signaux générés. Les tests dans le domaine temporel sont pour vérifier les caractéristiques temporelles du signal à transmettre. Parmi lesquelles il faut mentionner la durée d'un bit T_b , la largeur de rafale T.On (*width burst*,) et la durée du repos (T.Off), ainsi que la fréquence et les changements de phase. Compte tenu des caractéristiques de Tektronix® MDO4034B-3 Mixed Domain Oscilloscope, des tests ont été effectués sur une séquence de 30-bits échantillonnée à 0.11 GS/s portée à une fréquence de 340 MHz afin de pouvoir visualiser les mesures dans le domaine temporel. Cette séquence correspond respectivement à T.On = 90 ns et T.Off = 180 ns.

Les tests effectués à la fréquence porteuse de 2,45 GHz (figure 3.23) visent à mettre en évidence les effets de brouillage du spectre (étalement du spectre) et le compromis en termes d'atténuation sur le signal. À l'exception de la fréquence porteuse et la fréquence de l'échantillonnage, toutes les autres caractéristiques du signal testé dans le domaine temporel sont maintenues.

Pendant les essais, les modules NI PXIe ont été mis sur l'horloge *PXI Onboard Référence Clock Source* et leur température moyenne a été de 37,406 °C.

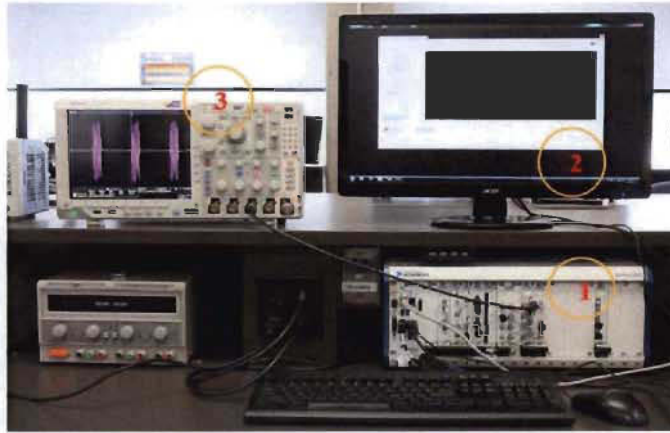


Figure 3.19. Infrastructure de tests et mesures

1. La plateforme PXIe-1075, la sortie RF est connectée à une entrée de l'oscilloscope.
2. L'interface du générateur développé par les modules PXIe-5673
3. L'analyseur de signal MDO4034B-3 Mixed Domain Oscilloscope. Cet appareil est utilisé pour la validation du générateur développé.

Les tests et mesures faits sur *MDO4034B-3* sont présentés en graphes suivants. Le premier graphe est une modulation OOK, le second une modulation BPSK pulsé avec une séquence régulièrement alternée et le troisième graphe présente une modulation BPSK pulsé avec une séquence générée selon la loi de Galois.

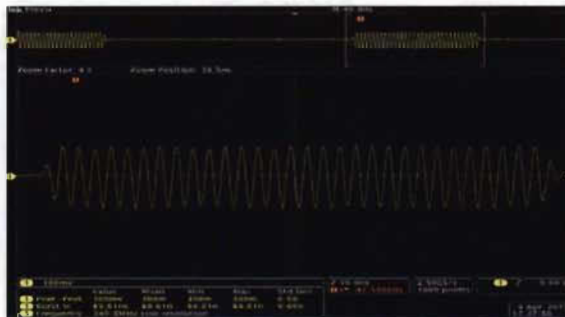


Figure 3.20. Signal OOK à 340MHz



Figure 3.21. Signal BPSK pulsé à 340MHz, avec une séquence régulièrement alternée



Figure 3.22. Signal BPSK pulsé à 340MHz, avec une générée selon la loi de Galois

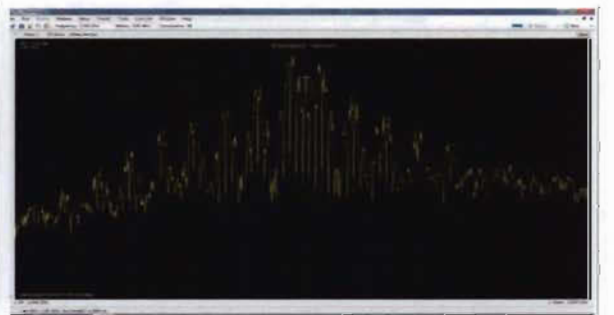


Figure 3.23. Spectre du signal BPSK pulsé à 2,45GHz, avec une séquence générée selon la loi de Galois

Le dernier graphe présente une analyse spectrale à 2,45 GHz de la modulation BPSK pulsé avec une séquence générée selon la loi de Galois.

Ces résultats ont été présentés à la conférence *IEEE Sensors 2015* à Busan, en Corée du Sud puis dans le journal *IEEE Sensors Journal* sous le titre “*Custom PXIe-567X-based SAW RFID Interrogation Signal Generator*”.

À une porteuse de 2,45 GHz, les résultats de comparaisons entre les valeurs de la puissance transmise par le lecteur (P_o) mesurées et celles définies par l'utilisateur sont donnés dans les tableaux suivants :

Tableau 3.1. Signal BPSK pulsé, $T_{On}=80ns$, $T_{Off}=160ns$, $f_c=2,45\text{ GHz}$, séquence générée selon la loi de Galois

Puissance définie par utilisateur (dBm)	Puissance mesurée (dBm)
-5	-5,8
-10	-11,79
-20	-21,78
-30	-31,81
-40	-41,39

Tableau 3.2. Signal OOK, $T_{On}=90ns$, $T_{Off}=180ns$, $f_c=2,45\text{ GHz}$, séquence générée non aléatoire

Puissance définie par utilisateur (dBm)	Puissance mesurée (dBm)
-5	-5,74
-10	-10,99
-20	-21,00
-30	-31,10
-40	-41,03

Les résultats de comparaisons spectrales entre un signal OOK et deux signaux BPSK pulsés générés par le générateur de signal d'interrogation.

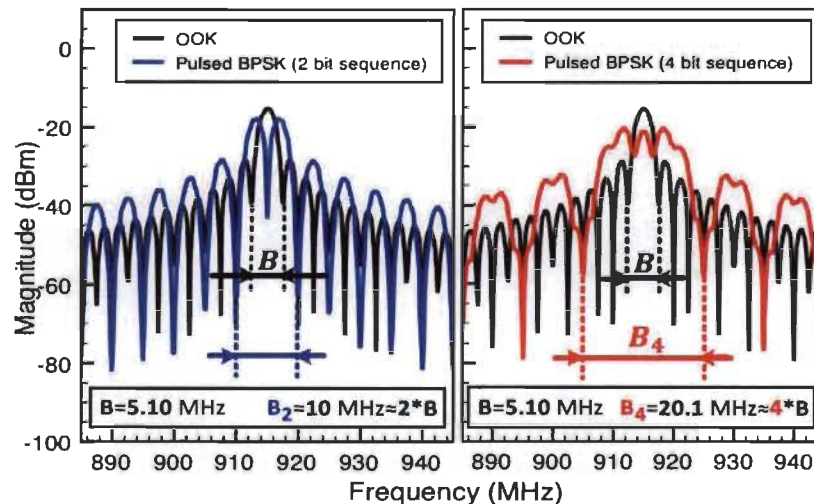


Figure 3.24 Comparaisons spectrales entre un signal OOK et deux signaux BPSK pulsés générés par le générateur

3.3.2.3 Programmation de l'analyseur des signaux vectoriels PXIe-5663

Tout comme le générateur, parmi les frameworks standard LabVIEW™, il n'existe pas encore de modèle de démodulateur pour un signal BPSK pulsé. Grâce à la flexibilité de la plateforme PXI Express, nous avons développé un diagramme LabVIEW™ pour configurer les trois modules de l'analyseur NI PXIe-5663 à cette fin. Au-delà de la complexité de réalisation d'un démodulateur BPSK pulsé, une autre particularité majeure de notre diagramme LabVIEW™ réside dans le fait que le programme peut aisément basculer entre les modes d'acquisition, sans interruption. L'architecture simplifiée des trois modules PXIe-5663, connue sous le nom de récepteur à conversion directe (voir figure 3.24), présente un aperçu général de leurs principes de fonctionnement [47].

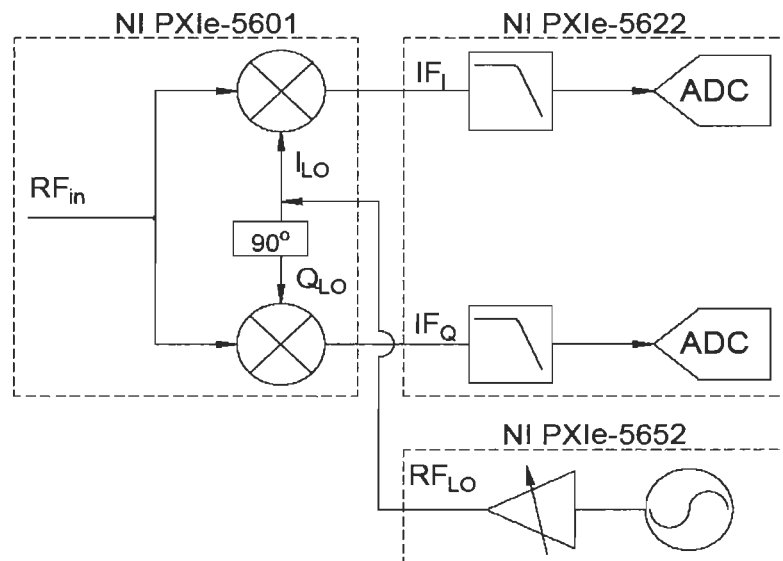


Figure 3.25. Architecture des modules PXIe-5663

Sur la figure montrant l'architecture simplifiée de PXIe-5663, le mélangeur (NI PXIe-5601) est le dispositif qui effectue le processus de conversion de fréquence. L'oscillateur local (LO) est un signal sinusoïdal qui peut être réglé en fréquence. Pour une approximation de premier ordre, le mélangeur effectue directement une multiplication dans le domaine temporel :

$$if(t) = rf_m(t) \times lo(t) = rf_m(t) \cos(2\pi rf_{LO}t) \quad (3-8)$$

Dans le contexte de la transformation de Fourier, nous pouvons appliquer le théorème de modulation pour obtenir l'équation (3-9) :

$$IF(f) = \frac{1}{2} [RF(f - f_{LO}) + RF(f + f_{LO})] \quad (3-9)$$

La fréquence *if* ou (*IF*) est appelée fréquence intermédiaire. C'est une fréquence à laquelle une onde porteuse est décalée (modifiée) lors d'une étape intermédiaire de transmission ou de réception. Comme la figure 3.24 le montre, la fréquence intermédiaire est créée en mélangeant le signal porteur avec un signal d'oscillateur local dans un processus appelé hétérodyne.

Le diagramme LabVIEW™ développé pour configurer et contrôler les modules est donné par les figures 3.26. Les figures 3.25 et 3.27 proviennent des deux structures *case* du diagramme de la figure 3.26 conformément aux couleurs indiquées sur ce dernier. Ces structures *case* contiennent des sous VIs permettant de basculer entre les deux types d'acquisition de signal et de modulations.

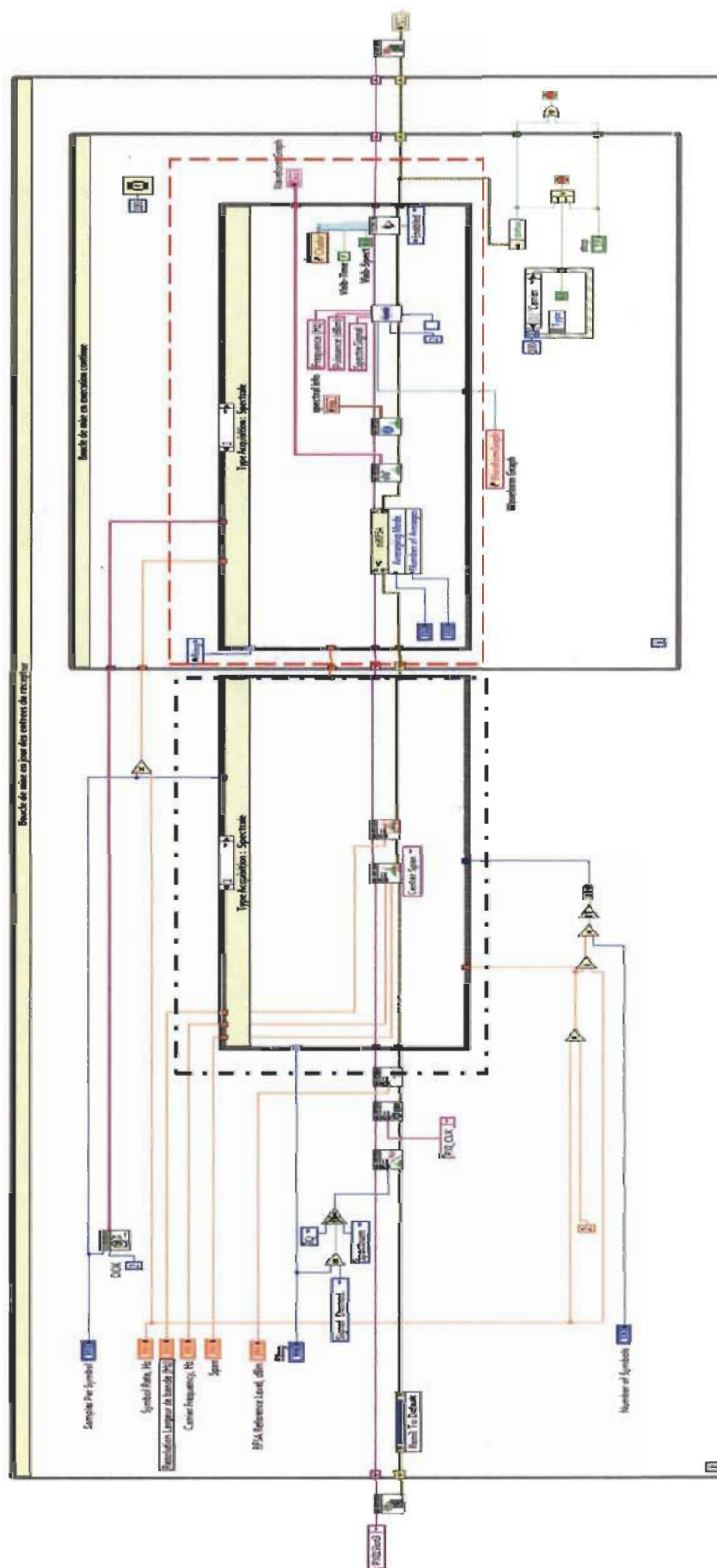


Figure 3.27. Code LabVIEWTM des modules PXIe-5663-Analyse spectrale

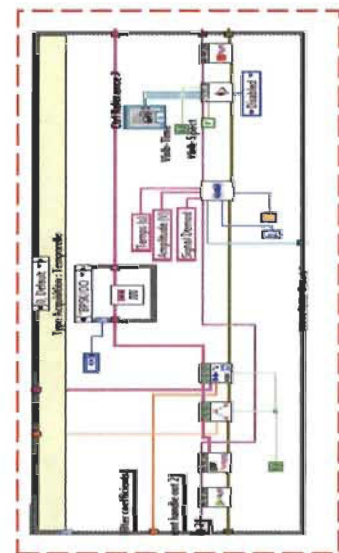


Figure 3.26. Seconde option de la Structure Case "1" - Démodulation

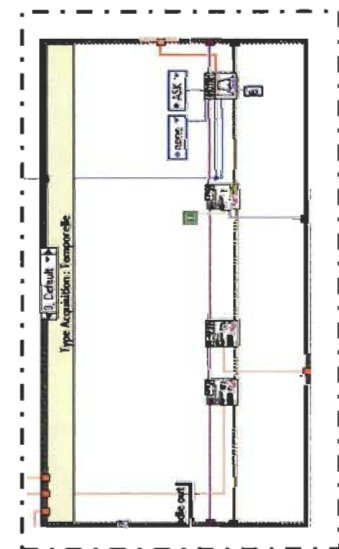


Figure 3.28. Seconde option de la Structure Case "2"- Démodulation OOK+BPSK pulse

3.3.2.3.1 Validation de l'analyseur PXIe-5663

Afin de valider l'analyseur de signaux vectoriels développé, nous avons repris les mêmes procédures de tests effectués sur l'analyseur de signal Tektronix® MDO4034B-3 Mixed Domain Oscilloscope et présentés ci-dessus. Dans le domaine spectral, le résultat obtenu pour un signal BPSK pulsé et porté à 2,45 GHz de porteuse est présenté par la figure 3.28. La démodulation est validée par des tests dont un résultat est donné par la figure 3.29.



Figure 3.29. Interface du démodulateur - Mode spectrale

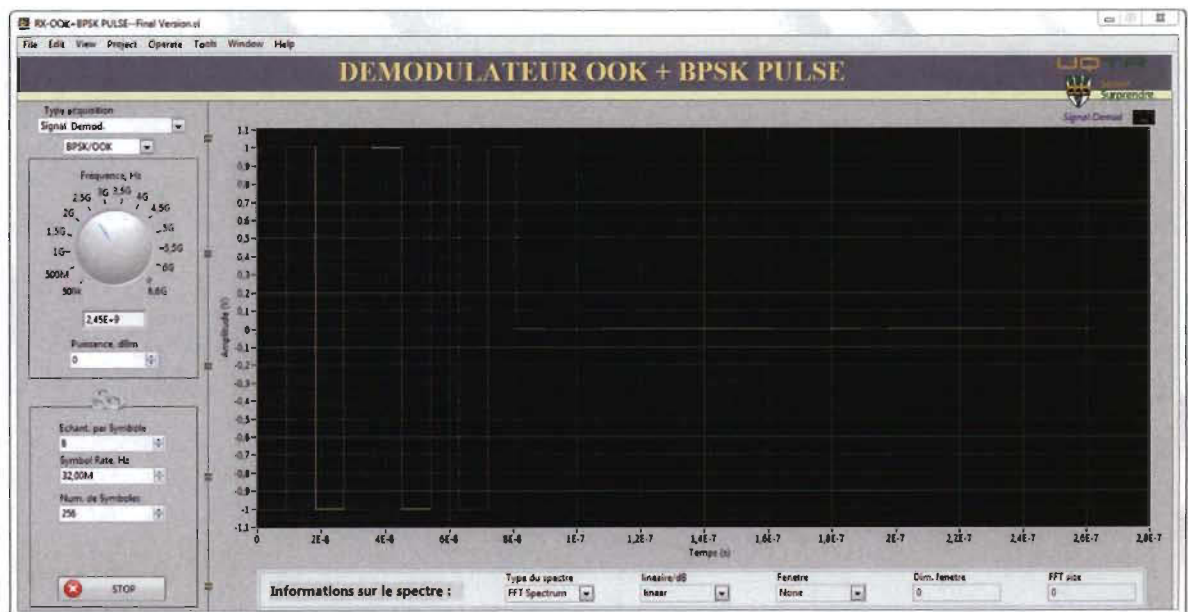


Figure 3.30. Interface du démodulateur - Séquence reçue après démodulation

Au-delà de 2,45 GHz, nous avons aussi testé le récepteur sur une fréquence de 5,8 GHz. Pour une séquence pseudo aléatoire (PN) générée selon la loi de Galois, et les durées T_{On} et T_{Off} respectivement fixées à $1\mu s$ et $4\mu s$ (voir annexes, figure 0.3), le spectre et la séquence obtenue après démodulation sont donnés par les deux premières figures suivantes.

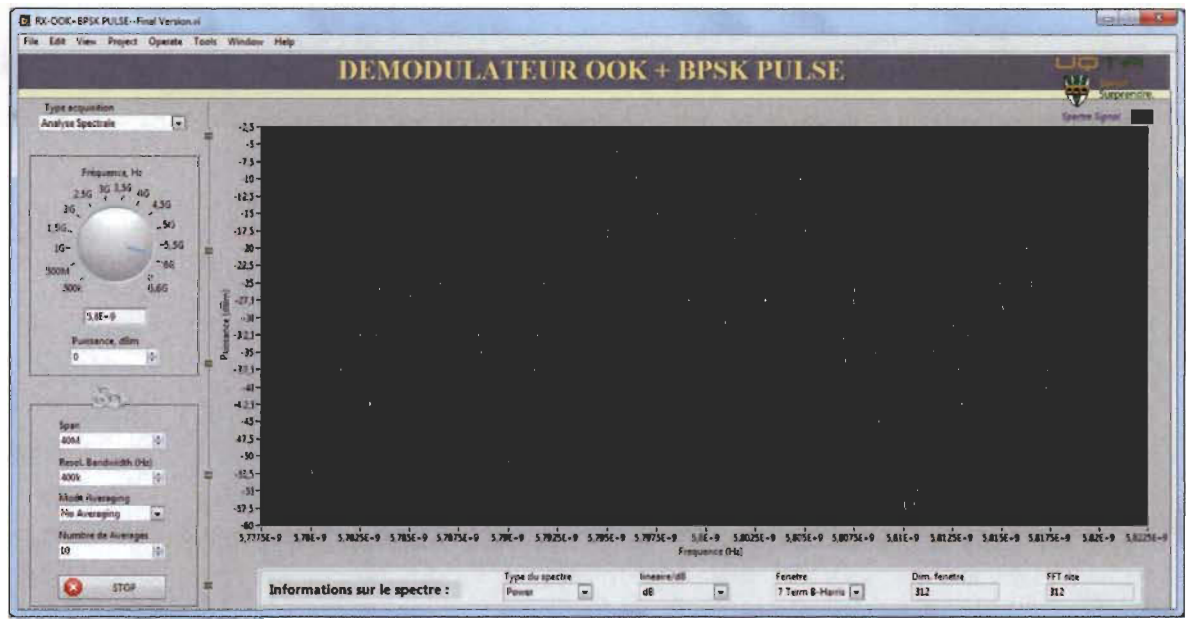


Figure 3.31. Spectre du BPSK pulse, $f_c = 5,8\text{GHz}$, $T_{On} = 1\mu s$, $T_{Off} = 4\mu s$

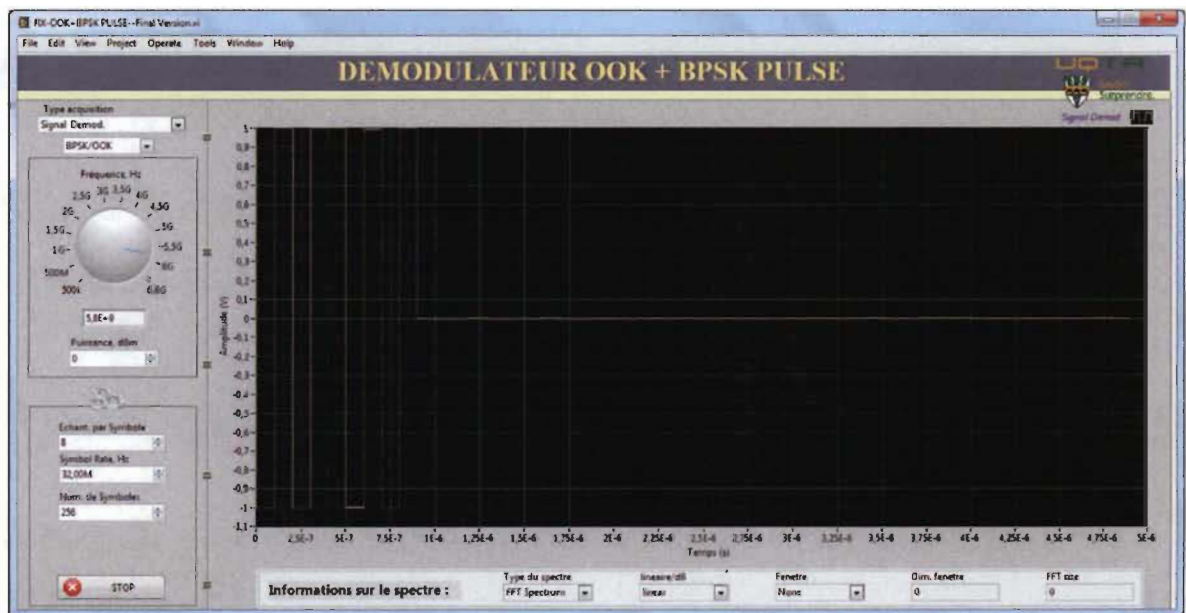


Figure 3.32. BPSK - Séquence reçue après démodulation, $f_c = 5,8\text{GHz}$, $T_{On} = 1\mu s$, $T_{Off} = 4\mu s$

Nous avons en fin testé le démodulateur sur un signal OOK portée à la même fréquence que précédemment ($f_c = 5,8\text{GHz}$, $T_{\text{On}} = 1\mu\text{s}$ et $T_{\text{Off}} = 4\mu\text{s}$). Les résultats sont portés sur les figures 3.32 et 3.33. La deuxième figure donne le résultat de démodulation tandis que la première correspond au spectre.

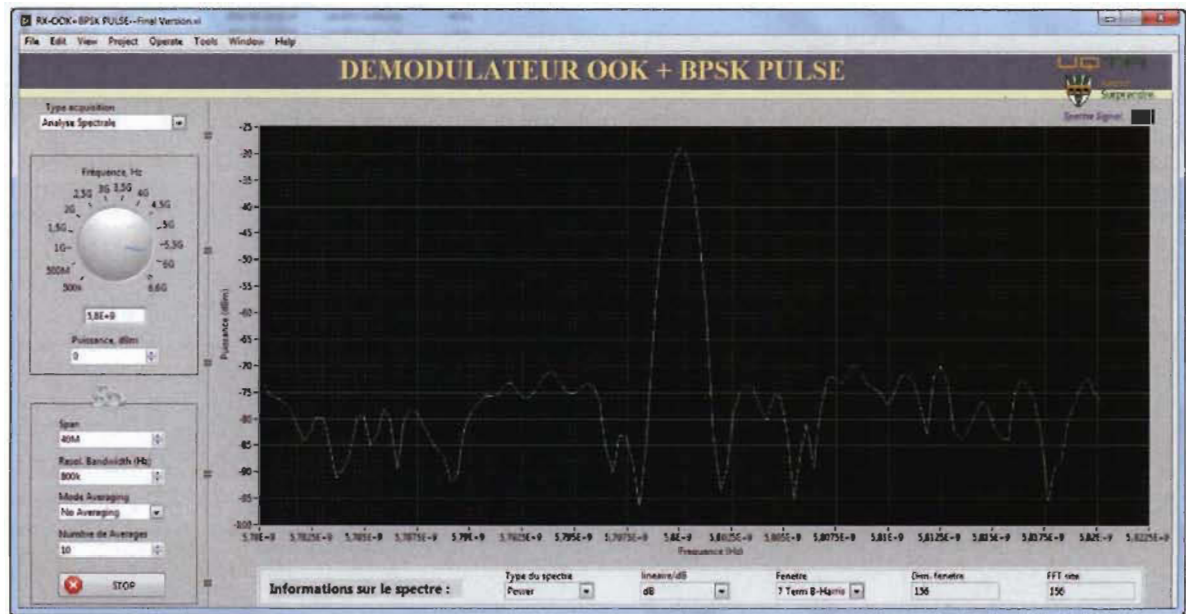


Figure 3.33. Spectre OOK, $f_c = 5,8\text{GHz}$, $T_{\text{On}} = 1\mu\text{s}$, $T_{\text{Off}} = 4\mu\text{s}$

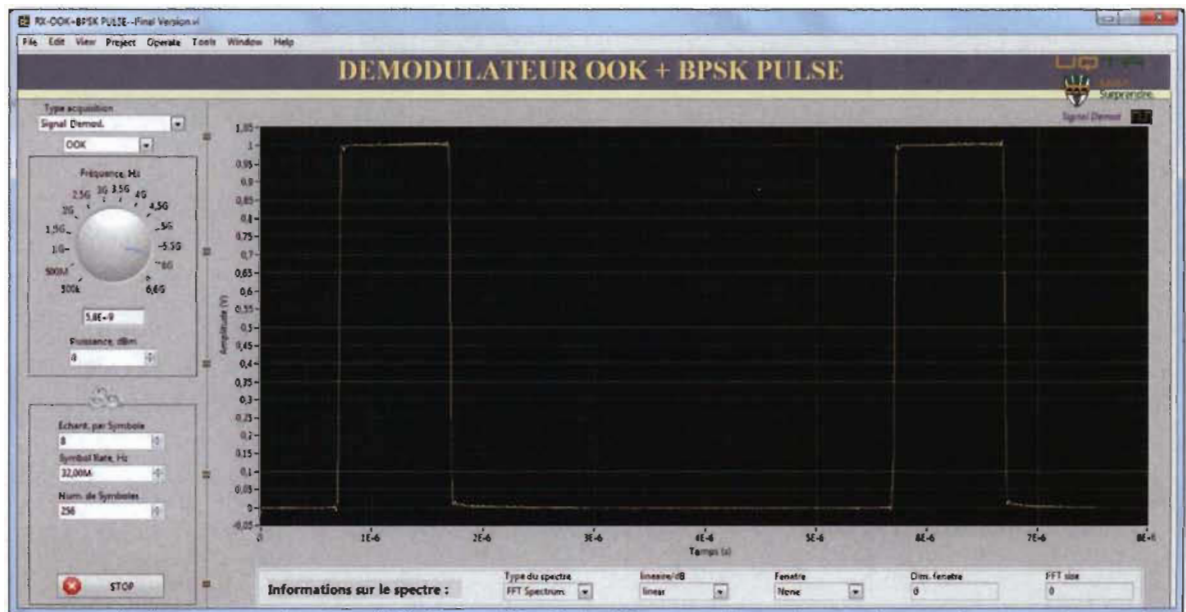


Figure 3.34. OOK - Séquence reçue après démodulation, $f_c = 5,8\text{GHz}$, $T_{\text{On}} = 1\mu\text{s}$, $T_{\text{Off}} = 4\mu\text{s}$

Pour un dispositif SAW quelconque placé à une distance d du lecteur développé sur PXI, les tests se font selon le principe décrit par le schéma suivant.

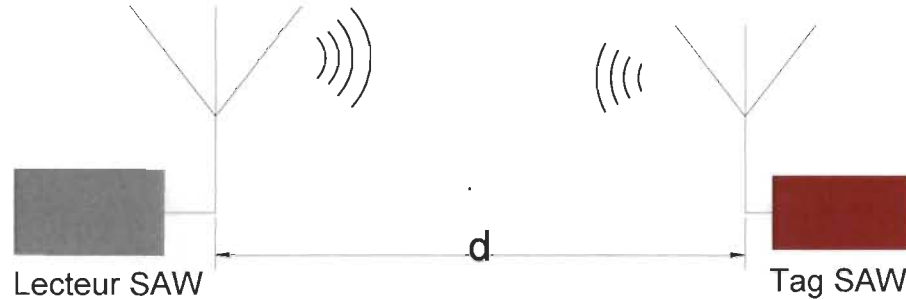


Figure 3.35. Principe de test d'un dispositif SAW

$$d = \frac{T_{total} - T_{SAW} - T_{systeme} - T_{cable}}{2} c_o \quad (3-10)$$

Où $T_{systeme}$ est le retard dû à l'ensemble contrôleur embarqué NI PXIe-8135, le commutateur RF, et l'unité du démodulateur. T_{SAW} et T_{cable} sont respectivement le retard sur le tag SAW et dans le cas échéant, le délai dû aux câbles de connexion SMA, BNC ou autres entre l'antenne du tag SAW et celle du système émetteur-récepteur. Et c_o est la célérité de la lumière dans l'espace libre.

Selon [10], [39], la portée maximale de détection d_{max} est décrite par l'équation (3-11) :

$$\frac{d_{max}}{\lambda} = \frac{1}{4\pi} \sqrt{\frac{P_o G_t G_r G_s^2}{IL k T_0 B NF SNR}} \quad (3-11)$$

Où

λ	Longueur d'onde ;
P_o	Puissance transmise par le lecteur ;
G_r, G_r	Gains respectifs de l'antenne d'émission et de réception ;
G_t	Gain de l'antenne du tag SAW ;
IL	Perte d'insertion du dispositif à ondes acoustiques (tag SAW) ;
$kT_0 B NF$	Puissance de bruit thermique utile (constante de Boltzmann, température absolue, la bande passante du système, et la figure de bruit NF) ;

SNR Ratio signal-bruit minimal nécessaire pour détecter le signal reçu en toute sécurité.

Dans le cas du châssis NI PXIe, la figure 3.36 propose un schéma de l'architecture pour les tests sans fil. Le circulateur a pour rôle d'assurer le « switch » entre le signal émis par le générateur NI PXIe-5673 et celui reçu par l'analyseur NI PXIe-5663. Pour tester un dispositif SAW, il faut commencer par :

- Evaluer l'importance des propriétés physiques de l'environnement pouvant affecter les résultats du test, telles que décrites au chapitre II.
- Connaître d'avance la signature (séquence binaire) du dispositif SAW et le type de modulation par lequel il répond aux excitations ;
- Définir la zone d'interrogation ZI, en estimant la distance théorique maximale d_{max} entre l'antenne de l'émetteur et le dispositif SAW donnée par l'équation ci-dessus.

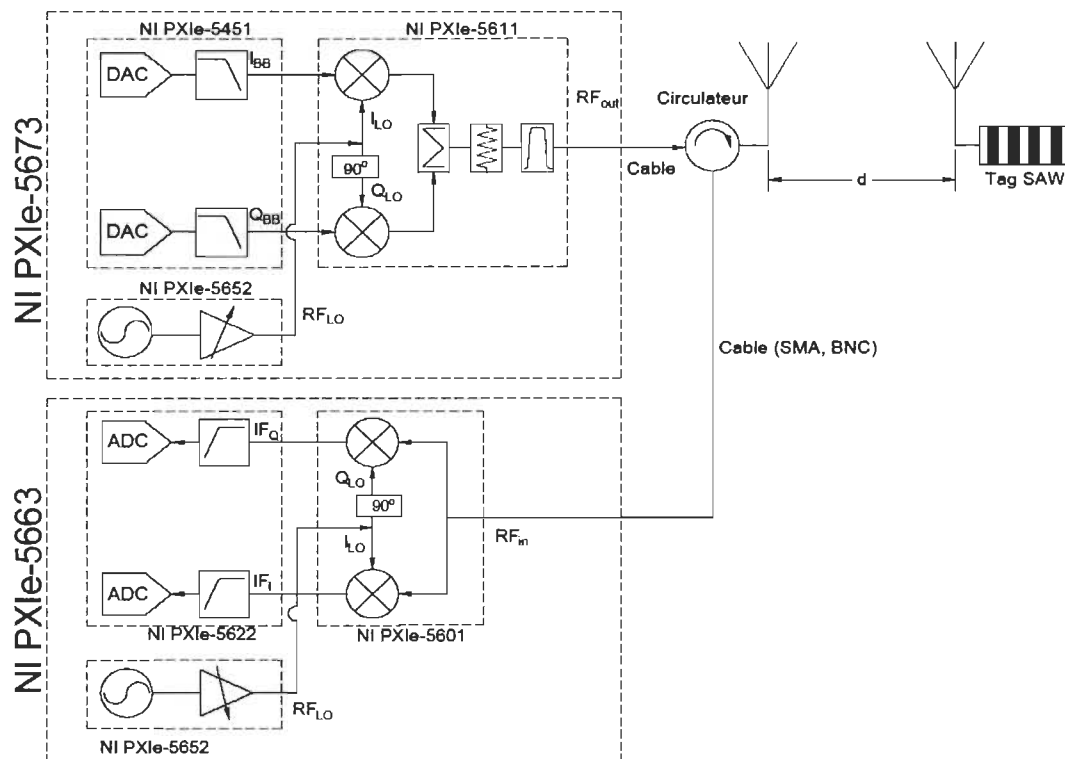


Figure 3.36. Schéma de l'architecture proposée pour les tests sans fil sur un dispositif SAW

CONCLUSIONS

Dans le présent travail, le premier chapitre donne un aperçu général des systèmes d'identification automatique (Auto-ID), le second chapitre est consacré à une revue bibliographique des systèmes RFID et le troisième chapitre présente les démarches, les infrastructures et les résultats de nos travaux de recherches.

Grace à la personnalisation de la plateforme PXI Express, nous avons réalisé un outil flexible et fiable adapté aux particularités des mesures/instrumentations sur les dispositifs SAW. Des tests effectués à des fréquences de 340 MHz, 2,45 GHz et 5,8 GHz sont donnés à titre d'exemple. La plateforme personnalisée couvre une gamme de fréquence allant de 85 MHz jusqu'à 6,6 GHz de porteuse, ce qui est largement suffisant pour couvrir les tests sur la majorité des dispositifs SAW. En termes d'intégrité des données, l'option étalement de spectre (BPSK pulsé) rend le système beaucoup plus robuste qu'aux lecteurs conventionnels des dispositifs SAW.

En ce qui concerne les perspectives à court terme, ce projet pourrait être amélioré par l'utilisation d'un module FPGA en parallèle au contrôleur embarqué NI PXIe-8135, en ce sens que le châssis PXIe-1075 support bien le module FPGA de la technologie Xilinx. Ceci pourrait éventuellement accélérer les processus de traitement du signal et améliorer la durée de vie du contrôleur.

Nous avons présenté en annexes d'autres images complémentaires du générateur de signal développé.

LISTE DES REFERENCES

- [1] K. Finkenzeller, *RFID Handbook: Fundamentals and Applications in Contactless Smart Cards, Radio Frequency Identification and near-Field Communication*. 2010.
- [2] D. Savir and G. J. Laurer, "The characteristics and decodability of the Universal Product Code symbol," *IBM Systems Journal*, vol. 14, no. 1. pp. 16–34, 1975.
- [3] P. Peretz, "Barcodes Demystified."
- [4] GS1, "GS1 General Specifications. Version 15," p. 490, 2015.
- [5] S. Schmid, A. Paris, A. Bosman, and F. Sharkey, "GS1 Human Readable Interpretation (HRI) Implementation Guide," no. 1, pp. 1–16, 2015.
- [6] A. Denso, "Qr code essentials," Retrieved fr om <http://www.nacs.org/LinkClick.aspx>, pp. 1–12, 2011.
- [7] K. Finkenzeller and R. Waddington, *RFID Handbook Translated by*. 2003.
- [8] W. Rankl and W. Effing, *Smart Card Handbook*, vol. 37. 2003.
- [9] M. Bolic, D. Simplot-Ryl, and I. Stojmenovic, *RFID systems: research trends and challenges*. John Wiley & Sons, 2010.
- [10] D. D. Arumugam, V. Ambravaneswaran, A. Modi, and D. W. Engels, "2D localisation using SAW-based RFID systems: a single antenna approach," *Int. J. Radio Freq. Identif. Technol. Appl.*, vol. 1, no. 4, p. 417, 2007.
- [11] L. M. Reindl, A. Pohl, G. Scholl, and R. Weigel, "SAW-Based radio sensor systems," *IEEE Sens. J.*, vol. 1, no. 1, pp. 69–78, 2001.
- [12] L. Reindl, G. Scholl, T. Ostertag, C. C. W. Ruppel, W.-E. Bulst, and F. Seifert, "SAW devices as wireless passive sensors," *1996 IEEE Ultrason. Symp. Proc.*, vol. 1, pp. 363–367, 1996.
- [13] L. Reindl and W. Ruile, "Programmable reflectors for SAW-ID-tags," *Proc. IEEE Ultrason. Symp.*, pp. 125–130, 1993.
- [14] K.-Y. Hashimoto, Ken-ya and Hashimoto, *Surface acoustic wave devices in telecommunications*. 2000.
- [15] L. Sydanheimol, J. Nummela, L. Ukkonen, J. McVay, A. Hoorfar, and M. Kivikoski, "Characterization of Passive UHF RFID Tag Performance," *Antennas Propag. Mag. IEEE*, vol. 50, pp. 207–212, 2008.
- [16] L. Sydanheimol, J. Nummela, L. Ukkonen, J. McVay, a. Hoorfar, and M. Kivikoski, "Characterization of passive UHF RFID tag performance," *Antennas Propag. Mag. IEEE*, vol. 50, no. 3, pp. 207–212, 2008.
- [17] I. RFSAW, "The Global SAW tag –SAW RFID Operation." RFSAW, Inc.
- [18] N. C. Karmakar, *Handbook of smart antennas for RFID systems / edited by Nemai Chandra Karmakar*. 2010.
- [19] V. P. Plessky, "Review on SAW RFID Tags," pp. 14–23, 2009.
- [20] S. Härmä, *SURFACE ACOUSTIC WAVE RFID TAGS: IDEAS , DEVELOPMENTS , AND EXPERIMENTS Doctoral Dissertation SURFACE ACOUSTIC WAVE RFID TAGS: IDEAS , DEVELOPMENTS , AND EXPERIMENTS Doctoral Dissertation*. 2009.
- [21] J.-P. Curty, M. Declercq, C. Dehollain, and N. Joehl, *Design and optimization of passive UHF RFID systems*. Springer Science & Business Media, 2006.

- [22] M. Katz, F. H. P. Fitzek, G. Iwacz, A. Jajszczyk, M. Zajackowski, K.-C. Chen, R. Prasad, K. Pahlavan, P. Krishnamurthy, and S. Primak, *RFID handbook: Fundamentals and applications in contactless smart Cards, Radio Frequency Identification and Near-Field Communication*. 2010.
- [23] C. Campbell, *Surface acoustic wave devices and their signal processing applications*. Elsevier, 2012.
- [24] W. R. Clemens C., *Advances in surface acoustic wave technology, systems and applications*. .
- [25] R. Air, I. Protocol, and M. Version, "EPC™ Radio-Frequency Identity Protocols Generation-2 UHF RFID Specification for RFID Air Interface," pp. 1–152, 2015.
- [26] R. H. Limits, "Federal Communications Commission Office of Engineering and Technology Laboratory Division Public Draft Review Draft Laboratory Division Publication Title : Guidelines for Determining the Effective Radiated Power (ERP) and Equivalent Isotropically Radia," pp. 1–5, 2015.
- [27] A. Craig, "Regulatory status for using RFID in the EPC Gen 2 band (860 to 960 MHz) of the UHF spectrum," *GsI*, vol. 928, no. May, pp. 1–22, 2014.
- [28] S. A. Weis, "RFID (Radio Frequency Identification): Principles and Applications Outline 1 Introduction 2 Applications 3 Principles 4 Challenges 5 Emerging Technologies Key Words : Abstract 1 Introduction."
- [29] S. To, G. Location, S. Shipping, C. Code, G. Shipment, T. Management, I. Management, G. Identification, G. Returnable, A. Identifier, G. Individual, G. Service, R. Number, G. Document, T. Identifier, and G. Coupon, "GSI Identification Keys at your finger tips," pp. 1–2.
- [30] "GLN Global Location Number (GLN)," p. 1.
- [31] "Global Shipment Identification Number (GSIN)," no. 17, p. 17.
- [32] C. Ginc, "GINC Global Identification Number for," p. 1.
- [33] D. Buckley, M. Cox, M. Frey, A. Hearn, A. Jones, U. Kemper, and F. Kempkes, "GSI Identification Keys in Transport & Logistics," no. 1, pp. 1–29, 2013.
- [34] "GSRN Global Service Relation Number (GSRN)," p. 18.
- [35] "GDTI Global Document Type Identifier (GDTI)," p. 1.
- [36] "GCN Global Coupon Number (GCN)," p. 1.
- [37] R. Air, I. Protocol, M. Version, D. Buckley, M. Cox, M. Frey, A. Hearn, A. Jones, U. Kemper, F. Kempkes, B. Celeste, C. C. Code, A. Strategy, R. H. Limits, C. Ginc, P. Measurement, S. Overview, P. Peretz, S. Schmid, A. Paris, A. Bosman, F. Sharkey, S. To, G. Location, S. Shipping, C. C. Code, G. Shipment, T. Management, I. Management, G. Identification, G. Returnable, A. Identifier, G. Individual, G. Service, R. Number, G. Document, T. Identifier, G. Coupon, and S. A. Weis, "CPID," no. 1, p. 1, 2015.
- [38] S. Y. Kim, J. K. Lee, S. W. Lee, H. K. Park, and Y. C. Ra, "A study on control method to reduce collisions and interferences between multiple RFID readers and RFID tag," *Proc. - 2009 Int. Conf. New Trends Inf. Serv. Sci. NISS 2009*, no. February 2005, pp. 339–343, 2009.
- [39] T. F. Bechteler and H. Yenigün, "2-D localization and identification based on SAW ID-tags at 2.5 GHz," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 51, no. 5, pp. 1584–1590, 2003.
- [40] "Antennas_mcgraw-hill_2nd_ed_1988-john_d_kraus.pdf." .
- [41] Y. Ge and D. G. Daut, "Bit Error Rate Analysis of Digital Communications Signal Demodulation Using Wavelet Denoising," 2011.
- [42] G. Breed, "Bit Error Rate : and Measurement Issues," no. January, 2003.

- [43] V. P. Plessky and L. M. Reindl, "Review on SAW RFID tags," *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*, vol. 57, no. 3, pp. 654–668, 2010.
- [44] L. Ave, "FUTURE HIGH VOLUME APPLICATIONS OF SAW DEVICES," 1985.
- [45] P. V. Nikitin, K. V. S. Rao, and S. Lazar, "An Overview of Near Field UHF RFID," *2007 IEEE Int. Conf. RFID*, 2007.
- [46] P. V Nikitin and K. V Seshagiri Rao, "LabVIEW-Based UHF RFID Tag Test and Measurement System," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 56, no. 7, 2009.
- [47] N. Instruments, "Super-Heterodyne Signal Analyzers."

ANNEXES

Dans cette partie, nous présentons les résultats complémentaires des tests à 340MHz, 2,45GHz et 5,8GHz. Les capture d'écran de l'interface du générateur aux fréquences susmentionnées correspondent aux signaux reçus et démodulés par le démodulateur présenté au chapitre 3.

Sur la figure 0.2, les durées T.On et T.Off de la séquence PN sont respectivement de 1 μ s et 4 μ s, ce qui fait la différence avec le test présenté à la figure 3.18, où pour la même fréquence de 2,45GHz, ces durées sont de 90ns et 180ns.

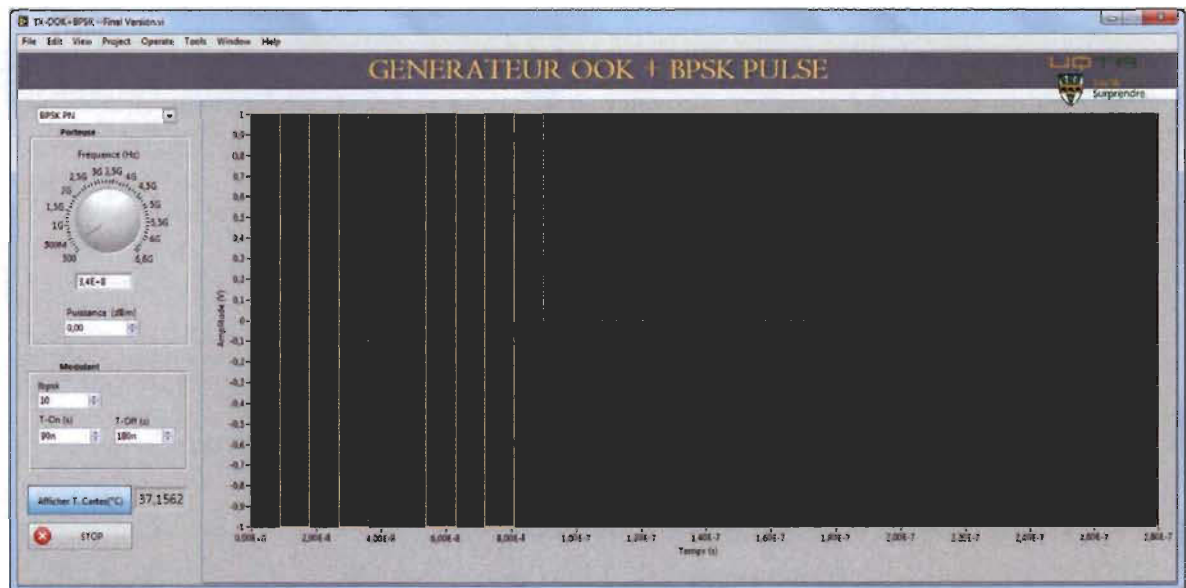


Figure 0.1. Signal BPSK pulsé à 340MHz, avec une séquence générée selon la loi de Galois (voir figure 3.22)

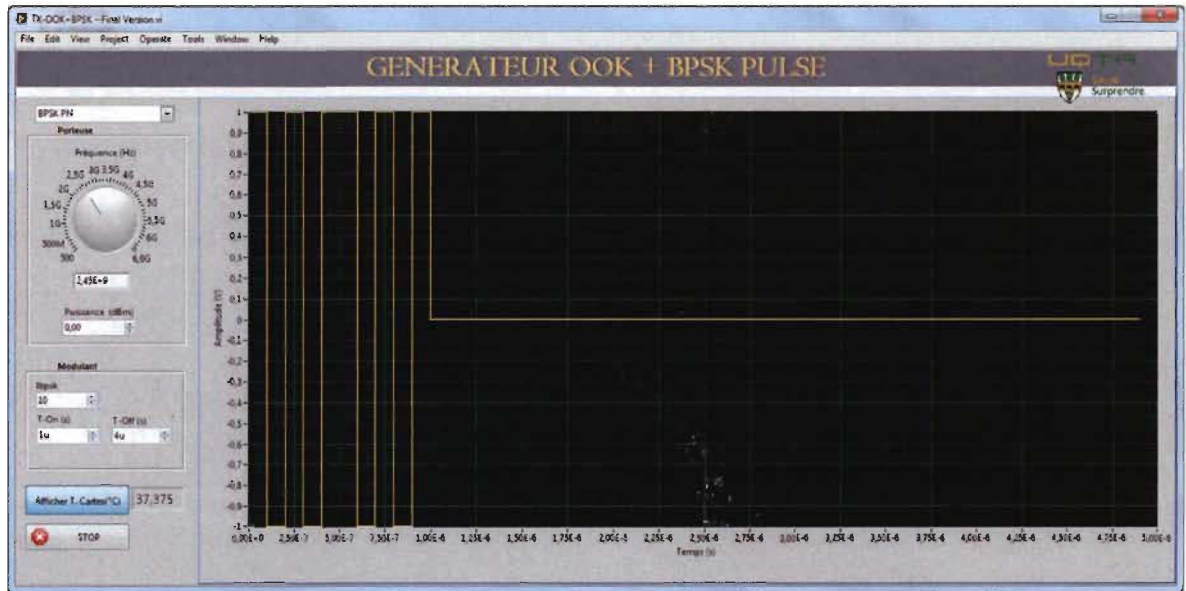


Figure 0.2. Signal BPSK pulsé à 2,45GHz, avec une séquence générée selon la loi de Galois

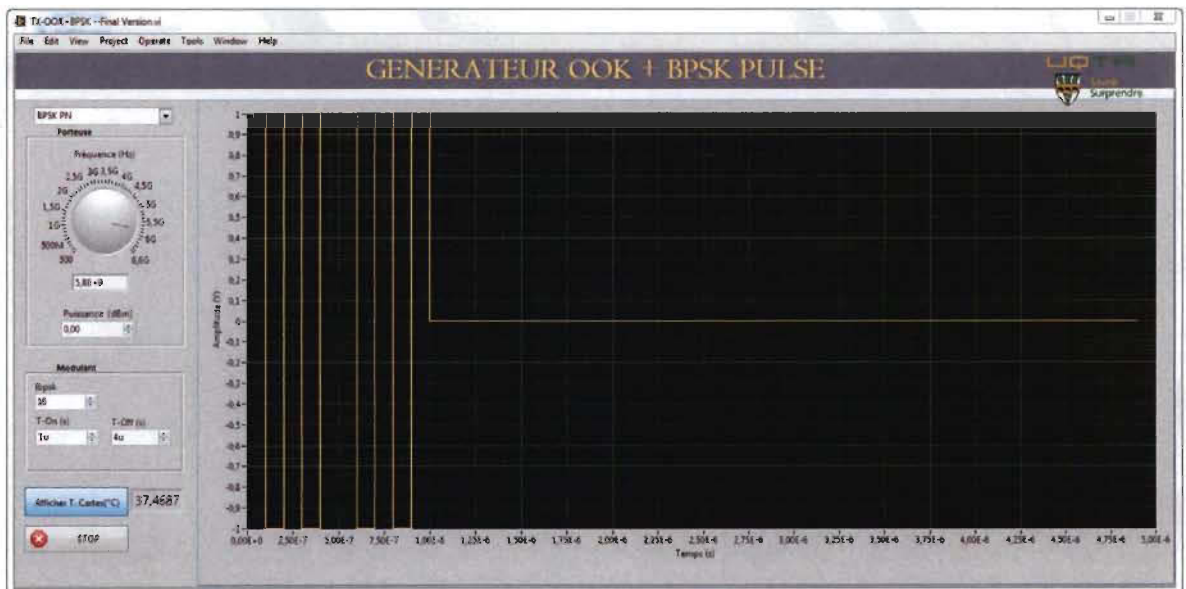


Figure 0.3. Signal BPSK pulsé à 5,8GHz, avec une séquence générée selon la loi de Galois